



Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agrària



PRESTACIONS D'UNA CÀMERA MONOFOCAL PER A LA CARACTERITZACIÓ D'ARBRES FRUI- TERS DES DE PLATAFORMES AÈRIES I TERRES- TRES.

Mesura de l'NDVI i comparació amb sensors
de reflectància.

AUTOR: ALBERT ROTÉS BIOSCA

TUTOR: ALEXANDRE ESCOLÀ AGUSTÍ

COTUTOR: JAUME ARNÓ SATORRA

Octubre del 2021

Títol: PRESTACIONS D'UNA CÀMERA MONOFOCAL PER A LA CARACTERITZACIÓ D'ARBRES FRUITERS DES DE PLATAFORMES AÈRIES I TERRESTRES: Mesura de l'NDVI i comparació amb sensors de reflectància

Autor: Albert Rotés Biosca

Tutor: Alexandre Escolà Agustí

Cotutor: Jaume Arnó Satorra

Data: Octubre del 2021

Resum

Cada vegada és més comú utilitzar tecnologies per tenir informació rellevant de les parcel·les agrícoles. La tecnologia avança a un ritme frenètic: el què fins fa pocs anys es feia amb costosos satèl·lits ara es pot dur a terme amb un simple dron i una càmera de pocs centenars d'euros.

Estem parlant de mesurar i mapar el vigor de cultius extensius i fruiters amb l'índex NDVI, clau des de fa dècades en l'agricultura de precisió. Aquest proporciona informació de l'estat dels vegetals en una escala del 0 a l'1.

La tecnologia avança molt, sí, però s'ha de saber utilitzar. En aquest estudi es pretén conèixer en quines condicions ha de funcionar una càmera monofocal NDVI recent sortida al mercat que en principi ha estat dissenyada per funcionar en plataformes aèries (drons).

Es desenvolupa un assaig en què s'utilitza aquesta càmera i un sensor de reflectància molt utilitzat, del qual se n'ha demostrat en molts estudis la seva eficàcia, per obtenir diferents tipus de mesures de l'NDVI en una fila d'arbres perers i saber, a partir d'anàlisis estadístics: i) si la càmera funciona correctament, ii) en quines condicions la càmera ha de treballar per donar bones lectures de NDVI, iii) comprovar la viabilitat d'obtenir un mapa de punts 3D de NDVI, iv) quines lectures són més interessants conèixer d'una filera d'arbres perers, v) elaborar un estudi d'interès de la utilització d'aquesta tecnologia en Fructicultura de Precisió.

A tots els què han confiat més en mi que jo mateix,

a tots els què falten.

Aquest treball experimental ha estat desenvolupat gràcies al projecte ***PAgFRUIT: Precision agriculture technologies to optimize canopy management and sustainable crop protection in fruit orchards*** del Pla d'Investigació Científica i Tècnica i Innovació 2017-2020 Programa d'R+D+I Orientat als Reptes de la Societat (Agència Espanyola d'Investigació).

Codi de projecte: **RTI2018-094222-BI00**.

El projecte està finançat pel Ministeri de Ciència, Innovació i Universitats.



AGRAÏMENTS

M'agradaria agrair a totes les persones que d'una manera o altre han ajudat en la realització d'aquest treball, en especial:

A l'Àlex Escolà i al Jaume Arnó, tutor i cotutor del treball, per tota l'ajuda, disponibilitat, paciència i optimisme que m'han brindat durant tot el procés del treball i durant les classes acadèmiques del grau.

Al Ricardo Sanz i al Jordi Llorens per la seva aportació en la part tècnica i informàtica de l'estudi.

A l'empresa Agroserveis Salse i companys de feina per la seva comprensió i flexibilitat amb la realització del treball.

A la meua família i amics que m'han animat, recolzat i ajudat, en aquest i en tants altres aspectes de la vida.

MOLTES GRÀCIES.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. ÍNDEX DE VEGETACIÓ DE LA DIFERÈNCIA NORMALITZADA	2
1.2. CÀMERA <i>MAPIR SURVEY3 W RGN</i>	4
2. OBJECTIUS	7
3. MATERIALS I MÈTODES UTILITZATS	9
3.1. PROVA PRELIMINAR	9
3.1.1. CAMP D'ASSAIG	10
3.1.2. PANELL DE CALIBRATGE	12
3.1.3. SOFTWARE DE PROCESSAMENT DE LES IMATGES	13
3.2. OBTENCIÓ DE LES IMATGES RGN (<i>MAPIR</i>) I DELS VALORS NDVI (<i>OPTRx</i>)	14
3.2.1. MESURES DELS VALORS PUNTUALS D'NDVI: SENSOR <i>AGLEADER OPTRx</i>	15
3.2.2. GEOREFERENCIACIÓ DE LES DADES NDVI I ARBRES: RECEPTOR GNSS-RTK <i>LEICA 1200+</i>	18
3.2.3. CAPTURA DE LES IMATGES RGN: <i>MAPIR SURVEY3</i>	20
3.3. OBTENCIÓ DE LES IMATGES NDVI	22
3.3.1. IMAGEJ 1.52K	23
3.3.2. MATLAB	24
3.4. ANÀLISI ESTADÍSTICA	25
3.4.1. OBJECTIUS DE L'ANÀLISI ESTADÍSTICA	26
3.4.2. ESCALAT I DIVISIÓ DE LES IMATGES	27
3.4.3. OBTENCIÓ DELS ARXIS DE TEXT	27
3.4.4. EXPERIMENT 1 (ANÀLISI 1): FACTORS QUE AFECTEN LA MESURA LATERAL DE L'NDVI EN PERERA	28
3.4.5. EXPERIMENT 1 (ANÀLISI 2): COMPARACIÓ DELS ANGLES DE VISIÓ LATERAL I ZENITAL	29
3.4.6. EXPERIMENT 2: VARIACIÓ ESPACIAL DE L'NDVI AL LLARG DE LA FILA	29
3.5. RECONSTRUCCIÓ DE FOTOGRAMETRIA	30
4. RESULTATS I DISCUSSIÓ	33
4.1. PROVA PRELIMINAR	33
4.2. ANÀLISI ESTADÍSTICA	34
4.2.1. EXPERIMENT 1 (ANÀLISI 1): FACTORS QUE AFECTEN LA MESURA LATERAL DE L'NDVI EN PERERA	34
4.2.2. EXPERIMENT 1 (ANÀLISI 2): COMPARACIÓ DELS ANGLES DE VISIÓ LATERAL I ZENITAL	41
4.2.3. EXPERIMENT 2: VARIACIÓ ESPACIAL DE L'NDVI AL LLARG DE LA FILA	44
4.3. RECONSTRUCCIÓ DE FOTOGRAMETRIA	46

5.	<u>ESTUDI D'INTERÈS EN FRUCTICULTURA DE PRECISIÓ</u>	<u>49</u>
6.	<u>CONCLUSIONS</u>	<u>55</u>
7.	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>59</u>
8.	<u>ANNEXOS</u>	<u>61</u>
8.1.	ANNEX I	61

ÍNDEX DE FIGURES

FIGURA 1. GRÀFIC DE LA DIVISIÓ DE L'ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC.	3
FIGURA 2. CÀMERA MAPIR SURVEY3. FONT: (MAPIR, 2016).	4
FIGURA 3. CÀMERA MAPIR INSTAL·LADA AL TRÍPODE DURANT LA PROVA PRELIMINAR.	9
FIGURA 4. ARBRES (PEUS) DES DE L'ORIENTACIÓ EST (E). ESQUERRA, PEU 4; DRETA, PEU 20.	10
FIGURA 5. DETALL DELS FRUITS DE L'ARBRE EN EL MOMENT DE L'ASSAIG.	11
FIGURA 6. SITUACIÓ DEL CAMP D'ASSAIG, CAMPUS ETSEA. EN BLAU EL CAMP D'ASSAIG, EN VERMELL LA FILA D'ASSAIG.	11
FIGURA 7. PANELL DE CALIBRATGE MAPIR. FONT: (MAPIR, 2016).	13
FIGURA 8. CAPTURA DE PANTALLA DEL SOFTWARE MCC.	14
FIGURA 9. SENSOR OPTRX I ANTENA GNSS, INSTAL·LATS AL SUPORT.	17
FIGURA 10. PLATAFORMA MÒBIL AUTOMOTRIU EN EL MOMENT DE LA PRESA DE DADES LATERALS.	18
FIGURA 11. A L'ESQUERRA, MOMENT DE GEOREFERENCIACIÓ DE LA POSICIÓ DELS ARBRES; A LA DRETA, BASE RTK INSTAL·LADA AL TERRAT DE L'EDIFICI 4. EN AMB DUES IMATGES ES VA UTILITZAR EL RECEPTOR GNSS RTK LEICA 1200+.	20
FIGURA 12. IMATGE DES DE LA CISTELLA GRUA A 12 M D'ALÇADA EN EL MOMENT DE LA CAPTURA D'IMATGES RGN AMB LA CÀMERA MAPIR.	21
FIGURA 13. ARBRE 4 VISTA EST. A L'ESQUERRA, IMATGE RGN SENSE CALIBRAR; A LA DRETA, IMATGE RGN PROCESSADA I CALIBRADA.	22
FIGURA 14. IMATGE NDVI DEL PEU 4, CARA EST UN COP ESCALADA I CREADES LES SELECCIONS ALT, MIG I BAIX I LES MOSTRES CORRESPONENTS (ZONES DE COLOR GROC). LES ZONES FOSQUES TENEN BAIX VALOR NDVI, LES ZONES CLARES TENEN ALT VALOR NDVI.	28
FIGURA 15. HISTOGRAMES NDVI. A DALT DE LA CARA OEST, A BAIX DE LA CARA EST; AMB I SENSE PARA-SOL: ESQUERRA I DRETA.	33
FIGURA 16. SEMI-VARIOGRAMA DE L'NDVI DE LA FILERA LATERAL EST.	45
FIGURA 17. MAPA INTERPOLAT DE L'NDVI DE LA FILERA AMB LECTURES DES DE LA CARA EST (SENSOR OPTRX).	45
FIGURA 18. GRÀFIC DEL PERFIL NDVI DE LA FILERA LATERAL, SOBREPOSAT AL MARC DE PLANTACIÓ: ELS ARBRES ESTAN CADA 1,5 M (LÍNIES VERTICALS).	46
FIGURA 19. MAPA DE PUNTS 3D DE LA VISTA LATERAL EST. A L'ESQUERRA PEU 4 A LA DRETA PEU 20.	47
FIGURA 20. MAPA DE PUNTS 3D DE LA VISTA ZENITAL.	47
FIGURA 21. GRÀFIC DEL VOLUM D'APLICACIÓ (EN L/HA) CALCULAT PER QUATRE EQUIPS D'APLICACIÓ DE FITOSANITARIS AL LLARG DE LA FILERA.	52

ÍNDEX DE TAULES

TAULA 1. CARACTERÍSTIQUES DE LA CÀMERA MAPIR SURVEY3. FONT: (MAPIR, 2016).	5
TAULA 2. DIMENSIONS DELS PEUS 4 I 20.	15
TAULA 3. DISTRIBUCIÓ EN ALÇADA DE LES ZONES DE MESURA PER ALS ARBRES INDIVIDUALS.	15
TAULA 4. COORDENADES DEL PUNT DE L'ESTACIÓ BASE RTK DE LA TEULADA DE L'EDIFICI 4.	19
TAULA 5. RESUM DE L'AJUST LINEAL DEL MODEL DE L'ANÀLISI 1.	34
TAULA 6. PROVA DELS EFECTES DE L'ANÀLISI 1.	35
TAULA 7. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A L'EFECTE SENSOR.	35
TAULA 8. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES T DE STUDENT DE L'EFECTE ORIENTACIÓ.	36
TAULA 9. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ SENSOR*ORIENTACIÓ.	36
TAULA 10. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A L'EFECTE VIGOR.	37
TAULA 11. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ SENSOR*VIGOR.	37
TAULA 12. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ ORIENTACIÓ*VIGOR.	37
TAULA 13. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ TRIPLE SENSOR*ORIENTACIÓ*VIGOR.	38
TAULA 14. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A L'EFECTE DE L'ALÇADA.	38
TAULA 15. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ SENSOR*ALÇADA.	39
TAULA 16. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ ORIENTACIÓ*ALÇADA.	39
TAULA 17. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ TRIPLE SENSOR*ORIENTACIÓ*ALÇADA.	40
TAULA 18. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ SENSOR*ORIENTACIÓ*VIGOR*ALÇADA.	41
TAULA 19. RESUM DE L'AJUST LINEAL DEL MODEL DE L'ANÀLISI 2.	42
TAULA 20. PROVA DELS EFECTES DE L'ANÀLISI 2.	42
TAULA 21. PROVA DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A L'EFECTE VISIÓ.	43
TAULA 22. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A L'EFECTE VIGOR.	43
TAULA 23. DETALLS DELS EFECTES: SEPARACIÓ DE MITJANES PER A LA INTERACCIÓ VISIÓ*VIGOR.	44
TAULA 24. PARÀMETRES INTRODUÏTS AL PROGRAMA DOSA3D.	50
TAULA 25. RESULTATS DEL CÀLCUL DEL PROGRAMA DOSA3D.	50
TAULA 26. VOLUM APLICAT DELS QUATRE EQUIPS PER L'APLICACIÓ DE FITOSANITARI.	53

1. INTRODUCCIÓ

L'agricultura del segle XXI evoluciona utilitzant, cada vegada més, tècniques d'Agricultura de Precisió (AP) per tal de fer front a diversos reptes, com ara l'augment de la població mundial, una producció i gestió dels recursos més eficients i adaptar-se al canvi climàtic (Bietresato et al., 2016).

L'AP és una estratègia de gestió que recull, processa i analitza dades temporals, espacials i individuals i les combina amb altres informacions per a recolzar les decisions de maneig d'acord amb la variabilitat estimada, i així millorar l'eficiència en l'ús dels recursos, la productivitat, la qualitat, la rendibilitat i la sostenibilitat de la producció agrícola (ISPA, 2015). En l'agricultura tradicional ja s'actua més o menys d'aquesta manera, aplicant els recursos en el moment i en les quantitats que es creuen més adequades però amb uns coneixements limitats a l'experiència i l'observació visual. Les noves tecnologies permeten conèixer molt millor les necessitats de les plantes i els sòls (que a simple vista sovint no són perceptibles o molt abans que ho siguin) i saber quan, on i com actuar, aplicant així els conceptes i les tècniques de l'AP.

L'AP cada vegada està més reconeguda degut al potencial que demostra tenir per a la producció agrària, per reduir el cost de producció i minimitzar el dany ambiental.

Es pot dir que l'AP es divideix (o es porta a terme) en 4 fases:

- i) Observació/presa de dades geo-referenciades amb sensors.
- ii) Processament, anàlisi i mapat de les dades espacio-temporals.
- iii) Interpretació de la informació i presa de decisió.
- iv) Actuació diferenciada.

Per als equips que porten muntats sensors al camp en la fase i), on s'ubica aquest estudi, el gran repte és aconseguir estabilitat, força motriu i evitar balançades al recórrer terrenys abruptes per evitar errors de lectura (Bietresato et al., 2016).

Paràmetres de la capçada dels arbres com l'alçada, l'amplada i el volum, així com l'índex d'àrea foliar i la porositat estan directament relacionats amb el comportament i el vigor

de la planta i, per tant, amb la producció final (Perry et al., 2018). Una manera indirecta de determinar el vigor d'una planta és fent una caracterització de l'NDVI.

1.1. Índex de Vegetació de la Diferència Normalitzada

L'Índex de Vegetació de la Diferència Normalitzada o NDVI (de la seva denominació en anglès *Normalized Difference Vegetation Index*) és el més conegut i utilitzat dels índexs de vegetació. Els índexs de vegetació són combinacions de les bandes espectrals que informen de certs paràmetres de la vegetació (Bietresato et al., 2016).

En concret, l'NDVI utilitza les bandes del roig i infraroig proper per calcular l'activitat fotosintètica i la quantitat de biomassa relacionades amb l'estat d'una planta en un estat fenològic concret.

Es basa en el fet que els pigments de les fulles d'una planta sana absorbeixen la major part de l'energia de l'espectre visible que reben, sobretot en les bandes del vermell i el blau i, en canvi, en el NIR¹ les parets plenes d'aigua reflecteixen la major part de l'energia. Contràriament, una planta que pateix algun tipus d'estrès disminueix l'absorció en el visible i disminueix la reflectància en el NIR. La part de l'espectre visible més sensible als canvis de l'activitat fotosintètica de la planta és el vermell, per això s'utilitza la diferència normalitzada entre el vermell i el NIR: equació (1), les seves longituds d'ona són respectivament 620-750 nm i 760 nm (Rouse et al., 1973). L'espectre electromagnètic té diferents divisions segons la longitud d'ona de les ones (Figura 1).

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_R}{P_{NIR} + P_R} \quad (1)$$

On NDVI és l'índex de vegetació de la diferència normalitzada, P_{NIR} és la reflectància del canal de l'infraroig proper (760 nm) i P_R és la reflectància del canal vermell (620-750 nm). Els valors varien entre -1 i 1, on valors per sobre de 0 indiquen presència de vegetació i a l'augmentar fins a 1 les condicions de vigor milloren.

¹ NIR: Near Infra-Red (Infraroig Proper).

Es poden utilitzar diferents tècniques i tipus de sensors per determinar aquests paràmetres, com fotogrametria o escaneig LiDAR.

El Grup de Recerca en Agricultura de Precisió (GRAP) de la Universitat de Lleida és pioner en recerca aplicada a l'anàlisi de tècniques i materials que poden ser interessants en l'entorn socioeconòmic de l'agricultura propera a la zona de Lleida.

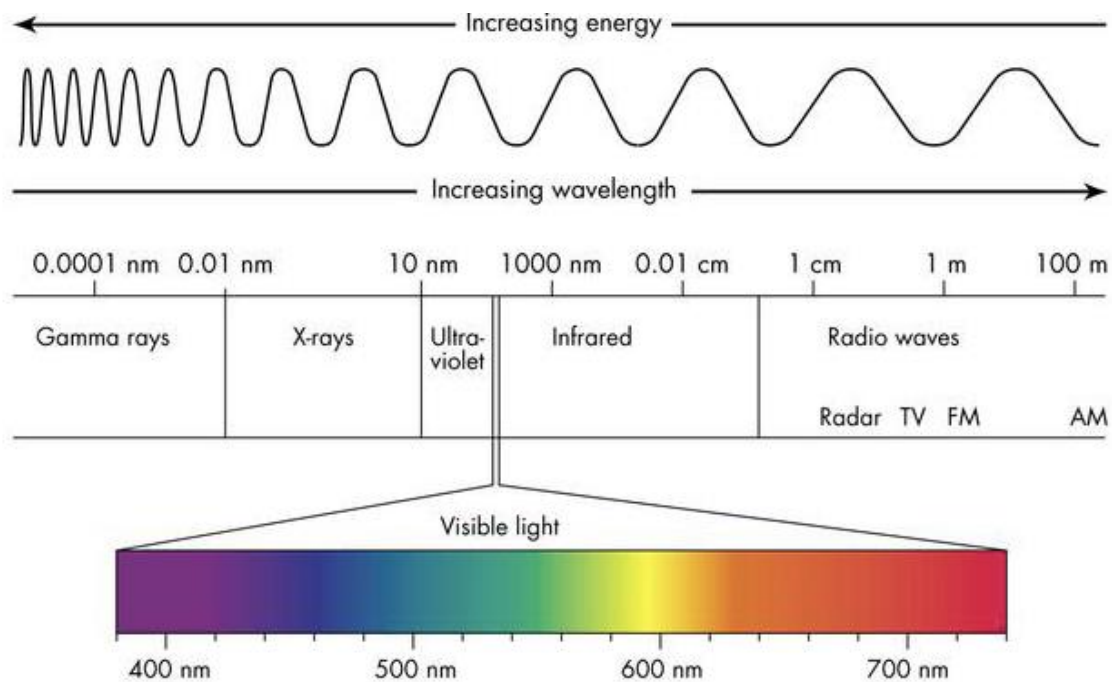


Figura 1. Gràfic de la divisió de l'espectre electromagnètic.

És per això que el GRAP està interessat en una línia de recerca de caracterització electrònica de la vegetació i també en l'anàlisi i mapat de variables a nivell de parcel·la.

El GRAP ha treballat en diversos estudis sobre la caracterització de l'arquitectura foliar dels arbres amb sensors LiDAR i, pel que fa al mapat, es vol estudiar la possibilitat de mapar la variable NDVI de la vegetació (principalment en arbres fruiters) des de terra (i no amb satèl·lit, avioneta o dron com es fa fins ara). Per a fer-ho, s'estudiarà la possibilitat de dur a terme el mapat del vigor dels arbres amb càmeres NDVI monofocals ja que les empleades en vehicles aeris acostumen a ser multifocals i així afegir la important variable NDVI als estudis de caracterització dels arbres (GRAP, 2021).

Quan es fan servir càmeres multifocals a poca distància, es fa difícil obtenir imatges exactes de la mateixa escena per cada canal ja que distorsionen la imatge a causa de la

distància entre els focus, a diferència d'una monofocal on la distorsió a curta distància pot ser mínima.

Recentment, un fabricant americà de càmeres NDVI (*MAPIR*) ha llançat al mercat un model monofocal (*SURVEY 3*) dissenyat per ser instal·lat en drons i fer mapats a poca alçada; en aquest estudi, la càmera s'assajarà instal·lada en un equip terrestre (visió lateral) i en una plataforma elevadora simulant l'acció d'un dron (visió zenital).

1.2. Càmera *Mapir Survey3 W RGN*

Es tracta d'una càmera monofocal (Figura 2) semblant a una càmera esportiva (per exemple, la coneguda *GoPro*®) amb la peculiaritat que té instal·lat un filtre pre-focal que controla les zones de l'espectre que percep segons la longitud d'ona. La imatge que dona és en format JPG² i format RAW³ però amb la peculiaritat que un dels canals dona informació impròpia de les càmeres RGB.

Les característiques més importants de la càmera estan detallades en la Taula 1.

Per aquest estudi s'ha treballat amb el filtre RGN, el qual permet passar la longitud d'ona de l'Infraroig Proper (IR) en comptes del blau. Llavors s'obté una imatge on el canal del blau (*Blue*) conté informació de l'IR que ens permet calcular l'NDVI.



Figura 2. Càmera *Mapir Survey3*. Font: (*MAPIR*, 2016).

² JPEG (Joint Photographic Experts Group): mètode i format de compressió d'imatges amb 24 bits.

³ RAW (de l'anglès "cru"): format d'imatge sense que la càmera hagi aplicat cap filtre, processat o comprimit.

La càmera ha estat dissenyada per a utilitzar-se en drons i realitzar mapats aeris a nivell de parcel·la o superior. La longitud d'ona que percep per al vermell és de 660 nm, 550 nm per al verd i 850 nm per al NIR, que ja és fora de l'espectre visible de la Figura 1 (MAPIR, 2016).

Taula 1. Característiques de la càmera Mapir Survey3. Font: (MAPIR, 2016).

Característiques càmera MAPIR Survey 3

<i>Resolució</i>	12MP (4.000 píxels x 3.000 píxels)
<i>Format imatge</i>	RAW i JPG
<i>Característiques òptiques</i>	41º HFOV ⁴ (47 mm), <1% deformació, Obertura f/3.0, lents de vidre.
<i>Sensor</i>	Sony Exmor R IMX117 12MP (Bayer RGB)
<i>Mida de píxel</i>	2,3 cm a 120 m
<i>Accessoris</i>	Receptor GNSS, Bateria 1.200 mAh, targeta memòria micro-SD (128 GB)
<i>Dimensions i pes</i>	59 mm x 41,5 mm x 36 mm ; 50 g

Col·laborant amb el GRAP, aquest estudi pretén treballar i fer un primer pas per tal d'integrar aquestes tecnologies per estudiar-ne la utilització i obrir la porta a nous projectes que permetin incorporar aquesta tecnologia als vehicles agrícoles empleats per les diferents tasques, minimitzant el cost i simplificant el procés d'obtenció de les dades. Per fer-ho, però, cal comprovar si hi ha diferències entre la vista zenital (des de l'aire) i la vista lateral (des de terra).

⁴ HFOV (sigles en anglès de *Horizontal Field Of View*): camp de visió horitzontal.

2. OBJECTIUS

Els objectius que pretén abordar aquest estudi són els següents:

- i) Desenvolupar un protocol per prendre les mesures que estableixi el mode d'ús de la càmera per obtenir mesures amb significació agronòmica.
- ii) Avaluar si existeixen diferències en la determinació de l'NDVI de forma zenital (angle de visió nadir) o des del costat de la filera (angle de visió lateral) en plantacions fruïteres.
- iii) Comprovar la viabilitat de dur a terme reconstruccions de fotogrametria per obtenir un mapa de punts 3D de l'NDVI a nivell de parcel·la.
- iv) Analitzar la variabilitat de l'NDVI entre arbres i dins la capçada, així com la variabilitat espacial de l'NDVI al llarg d'una filera (mesurat en aquest darrer cas amb un sensor de reflectància).
- v) Elaborar un estudi d'interès de la utilització d'aquesta tecnologia en Fructicultura de Precisió.

3. MATERIALS I MÈTODES UTILITZATS

Per tal de contestar les preguntes que es desenvolupen a partir dels objectius de l'estudi, es van dissenyar dos assajos (experiments) per tal d'aconseguir dades d'arbres fruiters en condicions reals. Aquestes dades cal tractar-les de diferent manera segons quins factors es vulguin tenir en compte i quines preguntes contestar, cal tenir clar doncs quin ha de ser el disseny experimental i el procediment de la presa de dades durant l'assaig. Un cop obtinguts i analitzats els resultats es poden treure conclusions i posteriorment elaborar un estudi de l'interès de la utilització d'aquesta càmera per tal de caracteritzar arbres fruiters.

3.1. Prova preliminar

En un primer contacte amb la càmera i seguint les instruccions del fabricant es va elaborar un primer protocol per poder determinar en quines condicions de llum havia de treballar la càmera, doncs es partia de la base que en dies molt assolellats el sensor es satura si els rajos solars impacten directament a la lent.



Figura 3. Càmera Mapir instal·lada al trípod durant la prova preliminar.

Es va realitzar un primer assaig seguint el protocol, en el què es van prendre diverses fotografies per tal d'extreure conclusions sobre com dur a terme l'assaig. Es va utilitzar la càmera *Mapir Survey3* (Figura 3).

3.1.1. Camp d'assaig

Els assajos es van desenvolupar en una de les parcel·les de pràctiques del campus de l'ETSEA (Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària de la Universitat de Lleida). Els arbres utilitzats per a l'estudi han estat perers (*Pyrus communis*) de la varietat, cv. Blanquilla (Figura 4).



Figura 4. Arbres (peus) des de l'orientació Est (E). Esquerra, peu 4; dreta, peu 20.

Els arbres en el moment de l'assaig es trobaven en l'*Estadi Principal 7. Formació del fruit. Estadi 75* de l'escala *BBCH* (CFIBAS (Centro Federal de Investigaciones biológicas para Agricultura y silvicultura), 2001) com es pot veure a les fotografies de la Figura 4 i Figura 5.



Figura 5. Detall dels fruits de l'arbre en el moment de l'assaig.

El marc de plantació era de 4,5 m x 1,5 m, havent-se considerat 3 fileres i havent-hi a cada fila 25 peus o arbres. El camp es gestionava com si fos un camp normal de producció amb un sistema de reg per degoteig.



Figura 6. Situació del camp d'assaig, Campus ETSEA. En blau el camp d'assaig, en vermell la fila d'assaig.

Per a la presa de dades, es va escollir la tercera fila i, per a l'anàlisi individual, van ser escollits els peus 4 (vigor aparent alt) i 20 (vigor aparent baix) d'aquesta mateixa fila, com es pot veure en el mapa de la Figura 6.

Per a cadascun d'aquests dos arbres, i per les cares Est (esquena al sol) i Oest (de cara al sol), es van fer les següents mesures i/o adquisicions:

AMB PARASOL per evitar sobreexposició a la llum solar, temps d'obturació 1/500.

- 1 fotografia al panell de calibratge.
- 1 fotografia de l'arbre sencer amb la càmera vertical.
- 4 fotografies de l'arbre amb 10 cm de desplaçament lateral, i a 4 nivells d'alçada diferents. En total, es van prendre 16 fotografies per a una primera prova de fotogrametria.

SENSE PARASOL, amb sobreexposició, temps d'obturació 1/500.

- 1 fotografia al panell de calibratge.
- 1 fotografia de l'arbre sencer amb la càmera vertical.
- 4 fotografies de l'arbre amb 10 cm de desplaçament lateral, i a 4 nivells d'alçada diferents. En total, 16 fotografies per a una primera prova de fotogrametria.

Amb aquest procediment, s'obtenien finalment les imatges RGN calibrades de l'arbre sencer, amb para-sol i sense, per les dues cares (4 imatges) per tal de comparar-les. Al calibrar les imatges de la cara Oest (de cara al sol), el software ens va informar que les imatges del panell de calibratge donaven valors erronis degut a un temps d'obturació massa curt.

3.1.2. Panell de calibratge

Es tracta d'un estoig que ofereix la marca *Mapir* per calibrar les imatges de les seves càmeres *Survey* (Figura 7). El model utilitzat és el 2 i té un cost d'uns 170 €. És un estoig de 30,75 x 25,4 x 3,18 cm a l'interior del qual hi ha quatre targetes de reflectància perfectament coneguda (mesurada amb espectròmetre) i un patró de reconeixement similar a un codi QR.

Per calibrar les imatges es va fer també una fotografia al panell en el moment de fer les altres, en les mateixes condicions de llum natural. Després, calia treballar amb un software que permetés processar i calibrar les imatges de la vegetació respecte la imatge del panell amb zones de reflectància coneguda.

Les targetes de reflectància eren de feltre i permetien una lectura correcta sense preocupar-se de l'angle amb el qual s'havia realitzat la fotografia.

El patró de reconeixement del panell facilitava la localització de les targetes de reflectància en el software de processament de les imatges (MAPIR, 2016).



Figura 7. Panell de calibratge Mapir. Font: (MAPIR, 2016).

3.1.3. Software de processament de les imatges

El software de MAPIR, anomenat *MAPIR Camera Control*, a partir d'ara *MCC*, és un programa lliure per al sistema operatiu *Windows* que serveix per al processament de les imatges de les càmeres *Survey* i *Kernel*⁵. Es pot descarregar lliurement des de la pàgina web de MAPIR, amb una interfície que es mostra a la Figura 8.

⁵ Kernel: Gamma professional de càmeres multifocals de la casa Mapir.

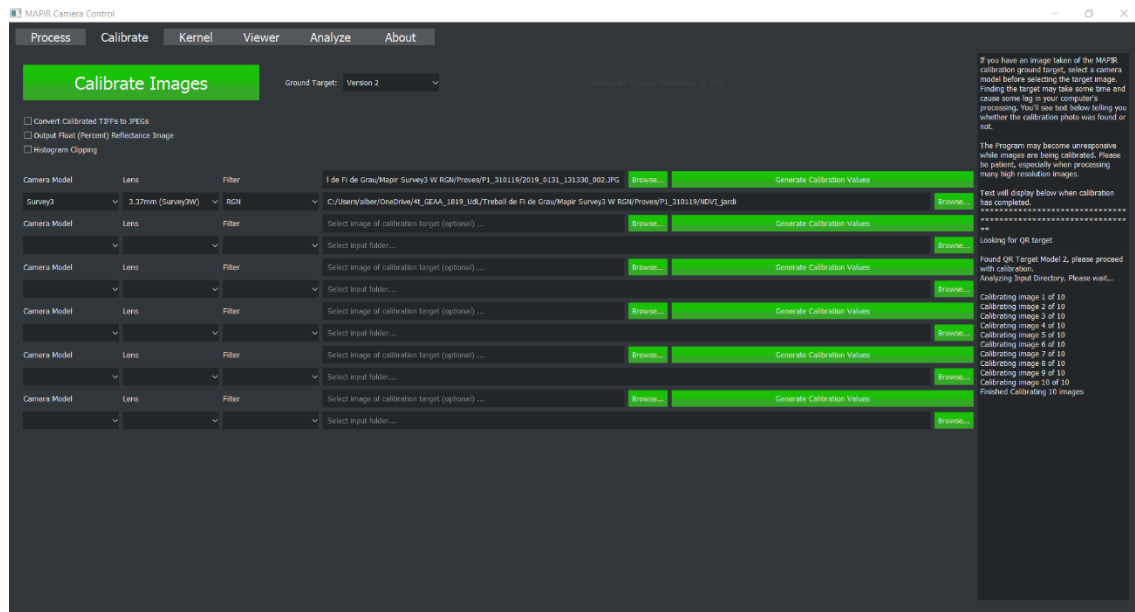


Figura 8. Captura de pantalla del Software MCC.

El software es va utilitzar per calibrar les imatges a partir de la imatge del panell de calibratge, de manera automatitzada i molt senzilla, en format JPG.

També tenia la funció de visor per a les imatges calibrades, i disposava d'una calculadora senzilla que permetia calcular i visualitzar l'NDVI de les imatges. Aquesta funció, però, es limitava a un visor i donava la possibilitat de guardar la imatge en format JPG però la imatge no tenia informació de l'NDVI, només informació RGB i no es podia utilitzar per a cap estudi posterior. Per tant, es va treballar en format JPG amb altres programes per obtenir l'índex NDVI (MAPIR, 2016).

Per la cara Est (d'esquena al sol, ben il·luminada) semblava que no hi havia major problema. De les 4 imatges, es van construir els histogrames dels valors de l'NDVI per tal de comparar-los.

3.2. Obtenció de les imatges RGN (MAPIR) i dels valors NDVI (OptRx)

Tant les imatges RGN (Mapir) com els valors NDVI (sensor de reflectància) van ser obtinguts durant l'assaig dut a terme el matí del dia 24 de juliol de l'any 2019, al Campus de l'ETSEA. Les condicions de llum eren les d'un dia assolellat de ple estiu a Lleida. Es va seguir el protocol elaborat a partir de la prova preliminar. L'assaig va consistir en simular les condicions de presa de dades que es podrien dur a terme a gran escala en una

parcel·la o explotació, per això no es va eliminar el fons tapant-lo, per exemple amb un llençol blanc com es faria en laboratori amb condicions perfectes.

Prèviament, es van portar a camp tots els materials necessaris per a l'assaig, es va descarregar la cistella-grua del camió i es va instal·lar la base GNSS-RTK.

Es van geo-referenciar els 25 arbres de la fila i se'n van escollir dos per a l'estudi individual: arbre d'alt vigor aparent (peu 4) i arbre de baix vigor aparent (peu 20) per tal d'afegir el factor vigor a l'anàlisi. Es van mesurar les dimensions dels arbres per a poder escalar després les imatges. Les mesures dels arbres es mostren a la Taula 2 i una fotografia de cadascun en la Figura 4.

En els dos arbres mencionats, es van delimitar addicionalment 3 zones segons l'alçada, i així poder afegir el factor alçada en el model lineal d'anàlisi de la variància. Les zones tenien 1 metre d'alçada i de llargada la mateixa que l'arbre en qüestió. Els nivells diferenciats van ser Alt, Mig i Baix amb la distribució en alçada mostrada en la Taula 3.

Taula 2. Dimensions dels peus 4 i 20.

ARBRE (de Sud a Nord)	4	20
VIGOR	Alt	Baix
ALÇADA (m)	3,4	3,1
AMPLADA (m)	2,0	1,7
PROFUNDITAT (m)	1,8	1,3

Taula 3. Distribució en alçada de les zones de mesura per als arbres individuals.

ZONA	Interval respecte el terra
ALT	de 2,5 m a 3,5 m
MIG	de 1,5 m a 2,5 m
BAIX	de 0,5 m a 1,5 m

3.2.1. Mesures dels valors puntuals d'NDVI: sensor AgLeader OptRx

Per tal de comprovar l'àrea de mesura abastada, es va determinar en un primer pas la forma d'aquesta àrea i el rang de distància de treball del sensor OptRx. La forma de l'àrea va resultar ser rectangular, amb una llargada entre 0,8 m i 1 m i una amplada de 0,1 m,

amb un rang de treball òptim (distància a la capçada) de 0,75 m a 0,90 m, però amb un rang possible entre 0,50 m i 1,25 m. Finalment, es va decidir prendre les mesures a 1,5 metres d'alçada i a 1 metre del peu de l'arbre (uns 0,5 m de les fulles).

El sensor *AgLeader OptRx* és un sensor òptic actiu que emet llum visible i infraroja i que quantifica la reflectància de l'objecte mesurat en les bandes vermella (670 nm), NIR (775 nm) i Red Edge⁶ (728 nm) (Perry et al., 2009).

Aquest sensor té una sortida de comunicacions amb protocol RS-232 que proporciona el valor de reflectància en els 3 canals esmentats anteriorment, l'índex NDVI i l'índex NDRE (de la seva denominació en anglès *Normalized Difference Red Edge*) de forma contínua amb una freqüència d'actualització d'aproximadament 1 Hz (1 lectura/segon). El podem veure a la Figura 9.

L'índex NDRE parteix del mateix principi que l'índex NDVI però utilitza el Red Edge (a partir d'ara RE) en comptes del vermell visible. Es calcula amb l'equació (2). Es tracta d'un índex que pot donar millor informació per a arbres grans o amb molta biomassa respecte l'NDVI ja que la llum vermella visible no penetra tant dins la copa de l'arbre com el RE (més proper a l'IR) (Boiarskii, 2019).

$$NDRE = \frac{P_{NIR} - P_{RE}}{P_{NIR} + P_{RE}} \quad (2)$$

On NDRE és l'índex de vegetació de la diferència normalitzada del Red Edge, P_{NIR} és la reflectància del canal de l'infraroig proper (760 nm) i P_{RE} és la reflectància del RE (entre 700 i 750 nm).

Les dades preses amb *OptRx* no estaven geo-referenciades pel propi sensor i es va utilitzar un receptor GNSS amb correcció RTK per fer-ho.

⁶ Red Edge (RE): zona de l'espectre entre el Vermell i l'Infraroig utilitzada per calcular l'índex NDRE i compresa entre els 0,70 i 0,75 micròmetres.



Figura 9. Sensor OptRx i antena GNSS, instal·lats al suport.

Es va utilitzar un programa amb entorn *LabView* amb l'ordinador *Getac* (ordinador de camp del GRAP) per capturar les dades d'NDVI i NDRE conjuntament amb les de posicionament en un arxiu de text. El programa ha estat dissenyat pel GRAP amb llenguatge de programació *LabView*.

Amb el sensor *OptRx* es van prendre un total de 36 mesures d'NDVI i NDRE amb l'objectiu de contrastar-les amb les respectives mesures de la càmera *Mapir* als peus 4 i 20. Es van considerar a l'atzar 3 valors NDVI per a les 3 zones (Alt, Mig, Baix) de les dues cares dels dos arbres. Els valors NDVI eren el resultat de la mitjana de valors presos amb una freqüència d'1 Hz durant pocs segons apuntant a la mateixa zona de l'arbre. Es va elaborar un arxiu de text amb les dades.

En un altre experiment (transsecte lateral al llarg de la filera), es van adquirir 310 dades de NDVI i NDRE per al transsecte lateral des de la cara Est i unes 330 dades per al transsecte lateral des de la cara Oest, amb el sensor instal·lat al mànec de la plataforma mòbil automotriu, avançant a una velocitat de 0,5 m/s fent coincidir el mànec amb el mig del carrer (a 2,25 m respecte l'arbre) i a 1,8 m d'alçada (zona mitja de l'arbre) juntament amb la càmera *Survey3*.



Figura 10. Plataforma mòbil automotriu en el moment de la presa de dades laterals.

La plataforma mòbil automotriu es tractava d'un vehicle híbrid dissenyat pel GRAP (Figura 10): la força motriu la generaven uns motors elèctrics i un motor de gasolina (grup electrogen) generava l'electricitat per als motors motrius i dispositius elèctrics que es poguessin necessitar. La plataforma podia moure's a una velocitat variable dins d'un rang de velocitats escollint la freqüència dels variadors dels motors elèctrics. La tracció dels motors elèctrics al terra era amb un sistema d'erugues de goma les quals permetien millorar l'estabilitat i tracció durant la presa de dades. També disposava d'un màstil on s'acoblava la càmera *Survey 3*.

Es va utilitzar per dur a terme la presa de dades durant el transsecte de tota la fila d'arbres a una velocitat i alçada constants.

3.2.2. Georeferenciació de les dades NDVI i arbres: Receptor GNSS-RTK *Leica 1200+*

Es tractava d'un receptor GNSS⁷-RTK⁸ de la marca *Leica*, utilitzat per a la georeferenciació d'elements dels quals ha estat necessari conèixer la seva posició per a l'estudi durant l'assaig.

⁷ GNSS: de l'anglès Global Navigation Satellite System, SSNG: Sistema Satel·litari de Navegació Global.

⁸ RTK: de l'anglès Real-Time Kinematic, posicionament cinemàtic en temps real.

Es van geo-referenciar les dades NDVI preses pel sensor *OptRx* i la posició dels arbres de la fila. Per fer-ho, es van obtenir les coordenades de dos punts de la fila dels arbres per tal de tenir la línia recta de troncs d'aquesta filera on varen ser projectades les posicions dels arbres (de l'1 al 25). Les coordenades exactes varen ser obtingudes a certa distància del peu (perpendicularment a la recta de la fila, com es pot apreciar a la Figura 11). Això evitava l'efecte de l'ombra de la copa de l'arbre i possibles errors de mesura.

- a) Receptor *GNSS RTK Leica 1200+* (base) al punt conegut del terrat de l'edifici 4 del Campus ETSEA. Aquest receptor, tal i com s'havia programat (*base*), utilitzava les constel·lacions GPS i GLONASS per comparar la seva situació exacta (punt conegut a la teulada de l'edifici 4 amb coordenades mostrades en la Taula 4) amb la posició que es calculava a partir dels satèl·lits. La diferència relativa l'enviava via radio al receptor mòbil (*rover*). Es pot veure una imatge del muntatge en la Figura 11.

Taula 4. Coordenades del punt de l'estació base RTK de la teulada de l'edifici 4.

COORDENADA	UTM 31T/ETRS89
<i>X (m)</i>	299763,818
<i>Y (m)</i>	4611430,818
<i>Z (m)</i>	202,546

- b) Receptor *GNSS RTK Leica 1200+* (*rover*) instal·lat a un suport amb el sensor *OptRx*. El receptor, antena i interfície eren idèntics a l'equip base (dos equips idèntics; es va aprofitar, però, la interfície). Per tant, es programava per a que actués com a *Rover*, en la presa de dades pertinents tal i com es mostra en la Figura 11.



Figura 11. A l'esquerra, moment de georeferenciació de la posició dels arbres; a la dreta, base RTK instal·lada al terrat de l'edifici 4. En ambdues imatges es va utilitzar el receptor GNSS RTK Leica 1200+.

3.2.3. Captura de les imatges RGN: *Mapir Survey3*

En el moment en que el sol es trobava al punt més alt, per tal que els rajos solars fossin més perpendiculars al terra i, per tant, l'orientació de la presa de dades tingués la mínima incidència (ombres), es van capturar les imatges RGN corresponents. En concret, per als arbres 4 i 20, individualment, amb para-sol per evitar sobreexposició i per cada cara (Est i Oest):

- 1 fotografia al panell de calibratge des d'uns 3 m.
- 1 fotografia de l'arbre sencer amb la càmera vertical des de la meitat del carrer, a 2,25 m del peu de l'arbre.
- 4 fotografies des d'1 m de l'arbre amb 10 cm de desplaçament lateral per a 4 nivells d'alçada amb dues repeticions. Això va suposar un total de 16 + 16 fotografies per a la reconstrucció dels arbres mitjançant fotogrametria.

Per al transecte de la fila en vista lateral, es va disposar la càmera instal·lada al màstil de la plataforma mòbil automotriu, avançant aquesta a una velocitat de 0,5 m/s des del mig del carrer (a 2,25 m respecte l'arbre) i a 1,8 m d'alçada (zona mitja de l'arbre) juntament amb el sensor OptRx:

- 31 fotografies per la cara Est.
- 33 fotografies per la cara Oest.

Per altra banda, es va simular el vol d'un dron a baixa alçada amb una plataforma-grua (alçada màxima de 15 m) per motius logístics, fent un transsecte de la fila en vista zenital amb la càmera instal·lada a la barana de la cistella de la plataforma (aproximadament, a uns 12 m del terra, Figura 12), i avançant a una velocitat constant de 0,3 m/s, de manera que la cistella i el braç no fessin ombra a la fila objectiu:

- 70 fotografies per a l'anada.
- 79 fotografies per a la tornada.



Figura 12. Imatge des de la cistella grua a 12 m d'alçada en el moment de la captura d'imatges RGN amb la càmera Mapir.

En total (vistes lateral i zenital), es van obtenir 344 fotos RGN (incloent imatges no empleades) amb la càmera *Mapir Survey3* que calia processar, calibrar i convertir a NDVI. Totes les imatges s'havien pres amb un temps d'obturació 1/500. Per a les mesures laterals, la càmera estava posicionada de forma vertical per tal d'encabir totalment l'alçada de l'arbre a cada fotografia. Això no va ser necessari per al transsecte zenital. El temps entre una imatge i la següent, per limitació de la càmera, va ser de 2,75 s.

Les imatges contenen la informació de la reflectància dels canals Red, Green i NIR, és a dir, cada píxel tenia associat un valor Red, un valor Green i un valor NIR. De fet, es tractava

d'una matriu amb els valors RGN. Les imatges tenien una tonalitat lilosa, amb la qual a simple vista es podia veure la forma dels elements. Un exemple es mostra en la Figura 13.

3.3. Obtenció de les imatges NDVI

Abans de convertir les imatges RGN a imatges NDVI, calia processar i calibrar-les amb el software de processament de les imatges *MCC*. Es va considerar que no calia fer correccions geomètriques, ja que la càmera no distorsionava les imatges al ser mono-focal. La correcció (calibratge) de les imatges va ser radiomètrica. Un cop processades pel software, les imatges es van agrupar per carpetes segons la imatge de calibratge a la qual s'havien de referir tal i com ho requeria el software. Es carregaven les imatges a calibrar i les imatges de referència al software (panell de calibratge) i es generaven primer els valors de correcció i després les correccions.

Aplicat aquest procés, s'obtenien les imatges classificades igualment en carpetes i es podia veure a simple vista la diferència de tonalitat. Es podia comparar una mateixa imatge abans i després de la correcció a la Figura 13.



Figura 13. Arbre 4 vista Est. A l'esquerra, imatge RGN sense calibrar; a la dreta, imatge RGN processada i calibrada.

Les imatges es van agrupar en una mateixa carpeta i es van classificar per nom segons l'arbre i l'angle de visió (lateral o zenital) al qual pertanyien, apunt per ser convertides a imatges NDVI.

En les proves preliminars, es va utilitzar un mètode rudimentari amb el programa *ImageJ* per tal de convertir les imatges RGN a imatges NDVI que, per a les 344 imatges, suposaven moltes hores i la creació de nombrosos fitxers innecessaris i una gran probabilitat d'error en el procediment.

3.3.1. [ImageJ 1.52K](#)

És un software *Java* de processament i anàlisi d'imatges per a diferents sistemes operatius i és de domini públic. Va ser desenvolupat per Wayne Rasband, voluntari al *National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA* (Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, s.d.).

ImageJ té un senzill panell on s'hi carreguen les imatges que cal processar o analitzar amb nombrosos menús i desplegable amb multitud de funcions. A més a més, es poden descarregar i instal·lar complements o *plugins* per tal d'ampliar la funcionalitat del programa. Pot llegir la majoria de formats d'imatge, d'entre ells TIFF, JPEG i RAW.

Les funcions que van ser utilitzades són:

Split Channels:

Menú desplegable *Image*, apartat *Channels*. Com el seu nom indica, és una funció que serveix per a dividir una imatge en els diferents canals de color que contingui. En aquest cas, separava els canals vermell (R), verd (G) i infraroig (NIR).

Image Calculator:

Menú desplegable *Process*. Com el seu nom indica, és una funció que permet fer càlculs amb les imatges: per a cada píxel d'una imatge, opera amb el píxel de la mateixa posició d'una altre imatge. La funció està limitada a només una operació per càlcul i crea una imatge nova amb el resultat del càlcul. Es va utilitzar per a calcular l'NDVI a partir de les imatges dels canals *Red* i *NIR*, operant primer per obtenir el numerador, després per obtenir el denominador i finalment obtenir el resultat de la divisió (imatge NDVI) segons l'equació (1).

El procediment explicat durava uns 5 min per a cada imatge, amb la creació de la imatge del numerador, la imatge del denominador i la imatge resultant de la divisió: imatge NDVI.

3.3.2. MATLAB

Per tal de ser més eficients en el procediment, es va dissenyar un programa amb l'entorn de programació *MATLAB* que imités el procediment rudimentari però, que en qüestió de pocs minuts, permetés obtenir el resultat per a les 344 imatges. I, a més, sense que fos necessària la creació d'arxius addicionals minimitzant a zero la possibilitat d'error en el "càlcul" de la imatge NDVI, ja que es tractava de fer vàries operacions per a cadascun dels 12 milions de píxels de cadascuna de les imatges.

El programa *MATLAB* (*MATrix LABoratory*) es tracta d'una eina de computació de problemes matemàtics, especialment de matrius, el qual és àmpliament utilitzat en enginyeria i programació. Va ser desenvolupat per l'empresa *MathWorks* i disponible a partir de l'any 1994, amb actualitzacions contínues (Mathworks, 2021; Moore, 2007).

El programa presentava una interfície per a programar (amb un llenguatge propi) dividida en una consola, un editor de funcions, un visualitzador d'arxius i variables, i diferents eines d'edició de gràfics i representació d'informació (Moore, 2007).

Amb aquesta eina es va desenvolupar un senzill programa capaç d'interpretar les imatges RGN calibrades per transformar-les en imatges NDVI útils per a les anàlisis estadístiques posteriors.

El programa dissenyat per a aquest objectiu estava format per dues funcions. La funció *channels.m* (ANNEX I) s'encarregava d'importar una fotografia en format JPG, on la informació de cada píxel s'emmagatzemava en format binari de 8 bits. Després de separar la imatge en 3 matrius de 3.000 elements x 4.000 elements, una per cada canal de la imatge RGN, ja era possible realitzar operacions algebraïques entre els elements de les matrius per al càlcul de l'NDVI segons l'equació (1).

Aquesta seqüència del codi s'aplicava a cadascun dels elements $M \times N$ de la primera matriu (canal R) i als corresponents elements $M \times N$ de la segona matriu (canal N) en cada operació.⁹

La matriu resultant de les operacions contenia el valor de l'NDVI de cada píxel de la imatge en format decimal. En format JPG i degut a la compressió, era impossible guardar els valors decimals (es comprimia en 256 grups de valors, sent els valors resultants nombres enters entre 0 i 255). Per tant, es va guardar la imatge en format TIFF¹⁰. Aquest format sí que guardava el valor decimal sencer. La funció (programa) a més, afegia al nom del fitxer l'extensió *_NDVI* per a la seva posterior identificació.

Aquest procés s'havia de repetir per a totes les imatges RGN calibrades. L'automatització del procés l'executava la funció *main.m* (ANNEX I), la qual creava una llista amb el nom de tots els fitxers JPG de la carpeta i cridava la funció *channels.m* per a cada un d'ells seqüencialment fins acabar la llista.

Aquest programa permetia agilitzar el procés a uns 3 segons per imatge (17 minuts per al total de les 344 imatges). A fi de validar el correcte funcionament del programa, es van contrastar diverses imatges NDVI amb les resultants del procés manual. Es buscaven manualment píxels a l'atzar homòlegs a les dues imatges NDVI (una obtinguda manualment amb ImageJ i l'altra automàticament amb MATLAB), i així comprovar que els valors NDVI eren idèntics.

3.4. Anàlisi estadística

Per a l'anàlisi de les dades es van utilitzar diferents programaris. Les dades obtingudes en un primer experiment (Experiment 1) estaven relacionades amb la mesura de l'NDVI en dos arbres perers de diferent vigor aparent. En aquest experiment, es disposava de dades de l'NDVI per a diferents factors i/o condicions de mesura: 'sensor' (càmera monofocal o sensor de reflectància multifocal), 'angle de visió' (lateral o zenital), 'vigor' i 'alçada' de l'arbre, i 'orientació' en lectures laterals (Est o Oest). L'anàlisi va contemplar, doncs, la

⁹ Element $M \times N$: es refereix a l'element de la matriu que correspon a la fila M i columna N.

¹⁰ TIFF (Tagged Image File Format): tipus de format d'imatges el qual conserva informació addicional en etiquetes.

formulació de dos models lineals d'anàlisi de la variància (anàlisi 1 i anàlisi 2) amb l'objectiu d'avaluar l'efecte dels factors mencionats anteriorment. En ambdós anàlisis, ha estat utilitzat el programari *JMP®Pro 15.2*: és un software de pagament de descobriment estadístic que permet trobar coneixements sovint ocults en taules de punts o gràfics. Desenvolupat per *SAS Institute* al 1989, la versió utilitzada va ser llançada l'any 2019, (Abousalhineto et al., 2021).

En un segon experiment, les dades disponibles eren les dades geo-referenciades de l'NDVI obtingudes amb el sensor de reflectància al llarg de la filera de 25 arbres perers (transsecte). Amb l'objectiu d'avaluar la variació espacial de l'NDVI al llarg d'aquest transsecte, es va obtenir el semi-variograma dels valors d'NDVI utilitzant el programari *VESPER 1.6* (Minasny et al., 2005). Per a la visualització del mapa resultant, es va utilitzar el programari *Quantum Geographic Information System (QGIS) 3.16.5* (és un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG) lliure que permet la visualització, edició i anàlisi de dades d'informació geogràfica, (QGIS Development Team, 2016)).

3.4.1. Objectius de l'anàlisi estadística

Les qüestions plantejades eren les següents:

EXPERIMENT 1. Factors que afecten la mesura de l'NDVI en arbres fruiters

- I. La càmera Mapir funciona correctament suposant que el sensor OptRx sí que ho fa i el prenem de referència?
- II. Les dues cares laterals d'un arbre fruiter (Est i Oest) són iguals pel que fa a la lectura de l'NDVI?
- III. Hi ha diferències entre vigors?
- IV. És necessari discriminar per les diferents alçades de l'arbre (Alt, Mig i Baix)?
- V. Varien les lectures zenitals de les laterals?

EXPERIMENT 2. Variació de l'NDVI al llarg d'una filera d'arbres fruiters.

- I. La variació espacial de l'NDVI lateral al llarg de la fila segueix un patró?
- II. Hi ha una variació periòdica lligada al marc de plantació?

3.4.2. Escalat i divisió de les imatges

Les imatges NDVI en les que calia dividir els arbres segons l'alçada (Alt, Mig i Baix) per a la presa de dades o mostreig, calia també escalar-les prèviament per tenir les mesures ben acotades. A l'obrir la imatge amb el programari *ImageJ*, es treballava amb coordenades relatives amb unitats de píxel. Sabent l'alçada total de l'arbre en mil·límetres, s'escalava la imatge amb la funció *Set Scale* permetent indicar gràficament la distància coneguda a la imatge (en píxels) i la mesura real en mil·límetres. Automàticament, la imatge quedava escalada per a l'eix X i per a l'eix Y ja que es considerava que no hi havia distorsió geomètrica. Igualment, es va realitzar per a les imatges zenitals coneixent la profunditat de la capçada de l'arbre (mesura perpendicular a la línia de la fila).

3.4.3. Obtenció dels arxius de text

Un cop escalades les imatges, ja es podien crear les zones segons alçada de l'arbre en les vistes laterals.

A continuació, es feia un mostreig en cada nivell d'alçada marcant aleatòriament tres 'frames' de 100 mm x 100 mm. Es va decidir que aquestes mostres de l'arbre també incloguessin porositat, simulant d'aquesta manera la lectura del sensor *OptRx* i poder comparar els valors d'NDVI entre aquest sensor i la càmera monofocal *Mapir*.

Es va utilitzar l'eina *Roi Manager* de *ImageJ* per a la creació de les zones (Alt, Mig, Baix) i la delimitació de les mostres (en groc a la Figura 14). Després, l'eina *Save XY Coordinates* de *ImageJ* va permetre exportar en un arxiu de text la coordenada X, la coordenada Y i el valor NDVI (de 0 a 1000 sense decimals) per a cada píxel del 'frame'. Els arxius resultants presentaven aquesta informació per als píxels continguts dins els 'frames' (tres per les zones 'Mig' i 'Baix'; sis per la zona 'Alt'). El valor mig d'NDVI fou llavors utilitzat en els models d'anàlisi estadística la Figura 14 és un exemple d'aquest procediment: imatge NDVI de l'arbre 4 (cara Est) amb els 'frames' o mostres marcades en groc.

Els arxius de text creats calia llavors preparar-los segons el model estadístic a utilitzar (veure apartats següents), i segons els requeriments del programa de processament estadístic (*JMP®Pro 15.2.0*).

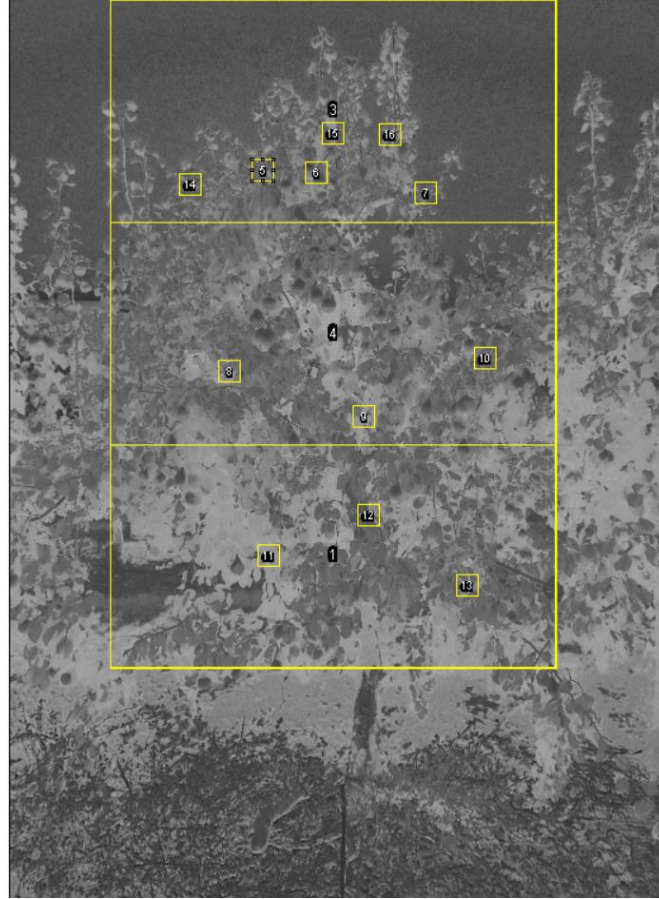


Figura 14. Imatge NDVI del peu 4, cara Est un cop escalada i creades les seleccions Alt, Mig i Baix i les mostres corresponents (zones de color groc). Les zones fosques tenen baix valor NDVI, les zones clares tenen alt valor NDVI.

3.4.4. Experiment 1 (Anàlisi 1): Factors que afecten la mesura lateral de l'NDVI en perera

Havent-se escollit dos arbres de diferent vigor, l'experiment pretenia esbrinar l'efecte que sobre la mesura de l'NDVI (variable depenent) podien tenir els següents factors: SENSOR (Mapir i OptRx), ORIENTACIÓ (Est i Oest), VIGOR (Alt i Baix) i ALÇADA DE LA CAPÇADA (Baix, Mig i Alt). Per a cada combinació dels factors anteriors, es van considerar 3 repeticions diferents ('frames') amb un valor corresponent d'NDVI calculat com la mitjana de valors NDVI dels píxels continguts dins de cada mostra o 'frame'. Es va disposar, per tant, d'un total de 72 dades d'NDVI.

L'arxiu de dades es va importar al programa JMP ajustant-se un model lineal complet de 4 factors (Sensor, Orientació, Vigor i Alçada) amb interacció (3):

$$\begin{aligned}
 y_{ijklm} = & \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \delta_l \\
 & + (\alpha\delta)_{il} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} + (\alpha\gamma\delta)_{ikl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} \\
 & + (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} + e_{ijklm}
 \end{aligned} \quad (3)$$

on y_{ijklm} era el valor d'NDVI, μ la mitjana general, α_i l'efecte del tipus de SENSOR utilitzat, β_j l'efecte de l'ORIENTACIÓ DE LECTURA, γ_k el VIGOR de l'arbre, i δ_l l'ALÇADA de la capçada. La resta de components corresponien a les interaccions entre factors, sent $e_{ijklm} \sim N(0, \sigma)$ el terme d'error.

Un cop comprovada la bondat de l'ajust del model, la separació de mitjanes per als factors que resultaren significatius es va portar a terme aplicant la prova t de Student per a factors simples de dos nivells, o el test HSD de Tukey per a aquells factors i/o interaccions amb més de dos nivells o combinacions. En tots els casos es consideraren significatius els factors amb un p-valor igual o inferior a 0,05 (nivell de significació).

3.4.5. Experiment 1 (Anàlisi 2): Comparació dels angles de visió lateral i zenital

En aquesta anàlisi, dissenyada a partir dels resultats de l'anàlisi 1 anterior, es pretenia comparar, separant els dos vigors (Alt o Baix), les mesures zenitals i les mesures laterals. Concretament, els factors avaluats van ser el VIGOR de l'arbre i l'ANGLE DE VISIÓ, presentant aquest darrer factor cinc nivells o tractaments diferents: zenital, costat Est i alçada Alta, costat Est i alçades Baixa-Mitjana, costat Oest i alçada Alta, costat Oest i alçades Baixa-Mitjana. Totes les lectures d'NDVI havien estat obtingudes amb la càmera *Mapir*, seleccionant-se sis 'frames' o 'repeticions' per a cada combinació de factors, la qual cosa proporcionava un total de 60 valors d'NDVI (base de dades).

L'arxiu es va importar al programa JMP per tal de formular un model bi-factorial amb interacció (4):

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk} \quad (4)$$

sent y_{ijk} el valor de la variable depenent NDVI, μ la mitjana general, α_i l'efecte de l'ANGLE DE VISIÓ, β_j l'efecte del VIGOR, $(\alpha\beta)_{ij}$ la interacció ANGLE DE VISIÓ-VIGOR, i e_{ijk} el terme d'error. Els factors significatius (p-valor < 0,05) eren després sotmesos a un test específic de separació de mitjanes igual que en l'anàlisi de l'apartat anterior.

3.4.6. Experiment 2: Variació espacial de l'NDVI al llarg de la fila

A partir de les dades preses amb el sensor *OptRx* del transsecte lateral per la cara Est (dades geo-referenciades) i la geo-localització de la posició dels arbres, es va elaborar un gràfic del perfil de variació de la variable NDVI al llarg de la fila. Tot i que la possible

influència del marc de plantació en provocar una variació periòdica de l'NDVI podia haver estat avaluada mitjançant una anàlisi espectral, l'estudi es va limitar a: i) obtenir el semi-variograma direccional dels valors de l'NDVI i interpretar els paràmetres del model ajustat, ii) mapar l'NDVI al llarg de la filera aplicant un mètode d'interpolació geo-estadística (*kriging*¹¹). L'objectiu era establir alguna mena de patró en el comportament de la variable NDVI al llarg de la fila, contrastant quin podia ser el rang o distància d'autocorrelació per a una filera d'arbres. La hipòtesi de partida era el possible efecte de la posició dels troncs dels arbres (marc de plantació) creant valors periòdics (pics) de variació de l'NDVI al llarg de la fila. Es va escollir la cara Est, ja que era la cara il·luminada i se sabia del cert que les dades eren correctes.

El model de variograma ajustat va ser el model lineal amb llinar (*linear with sill*), amb paràmetres $C_0 = 0,001066$ (*nugget*), $C_1 = 0,0006763$ (variància estructural), i $A_1 = 41,14$ m (abast). A partir d'aquest model espacial de semi-variograma, va ser possible mapar el valor de l'NDVI al llarg de la fila aplicant un *kriging* puntual sobre una malla d'interpolació (*grid*) de 0,5 m, i utilitzant entre 25 i 35 punts veïns per a la interpolació local de cada píxel. La interpretació del variograma, els paràmetres d'ajust i el mapa resultant es mostren en la secció de resultats.

3.5. Reconstrucció de fotogrametria

Es pretenia estudiar la viabilitat de realitzar una reconstrucció 3D (mapa de punts) de l'NDVI per a propers estudis. Es va utilitzar el programa *AgiSoft Photoscan 3D*.

Es tracta d'un software desenvolupat per *AgiSoft*, capaç de crear models 3D (núvols de punts) a partir de fotografies amb la tecnologia de reconstrucció 3D *multi-view*. És a dir, que a partir de diferents imatges (almenys dues) del mateix objecte, es troben punts comuns de les imatges un cop alineades i es genera el model 3D. Tant l'alineació de les imatges com la generació del model 3D (o núvol de punts) estan completament

¹¹ *Kriging* o regressió en processos Gaussians: mètode de predicció lineal que assumeix que dades d'una determinada població estan correlacionades en l'espai.

automatitzats. Calia que les imatges però, tinguessin un gran solapament de la visió per facilitar l'alineació (Agisoft, 2021).

Un cop generat el model 3D, calia escalar el model a partir de distàncies conegudes ja que el programa no coneixia la distància i posició des de la qual s'havien realitzat les fotografies respecte l'objecte. El model 3D estarà creat per multitud de punts, dels quals es coneixen les seves coordenades relatives (X,Y,Z) i el valor, en aquest cas NDVI associat.

El software ha estat cedit des del GRAP.

Es van intentar crear les següents reconstruccions de fotogrametria:

- Arbre 4 EST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Arbre 4 OEST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Arbre 20 EST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Arbre 20 OEST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Fila LATERAL EST a partir de 31 imatges.
- Fila LATERAL OEST a partir de 33 imatges.
- Fila ZENITAL x 2 intents a partir de 70 imatges a l'anada i 79 imatges a la tornada.

4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.1. Prova preliminar

Visualment es pot veure com les fulles de la part més alta on toca el sol directament tenen valors NDVI més baixos que la resta i queden integrats amb el fons (valor baix de NDVI), fet que dificulta la discriminació de valors NDVI establint un llindar (per exemple, classificar com a fulla valors més grans que 0,5).

El tronc i les fulles donen valors molt similars d'NDVI, en principi el tronc no té tanta activitat fotosintètica com les fulles i hauria de donar valors NDVI més baixos.

Amb parasol i sense els valors són gairebé iguals, com es pot comprovar amb els histogrames dels valors NDVI per a un mateix arbre, (Figura 15) indicant que la càmera *Survey3* i el software de correcció de les imatges *MCC* funcionen correctament per ambdues situacions.

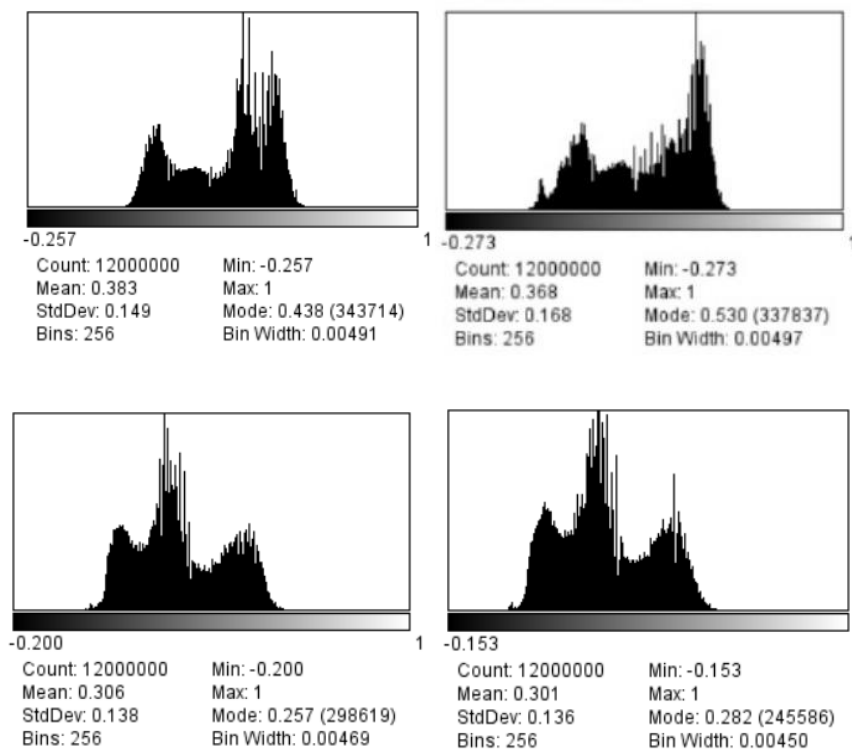


Figura 15. Histogrames NDVI. A dalt de la cara Oest, a baix de la cara Est; amb i sense para-sol: esquerra i dreta.

4.2. Anàlisi estadística

A continuació s'exposen els informes dels resultats que es desprenen de l'anàlisi estadística en format de taules i gràfics, elaborats amb el software *JMP*, amb la finalitat de respondre a les preguntes formulades a l'apartat 3.4.1.

4.2.1. Experiment 1 (Anàlisi 1): Factors que afecten la mesura lateral de l'NDVI en perera

A la Taula 5 del resum de l'ajust lineal del model es comprova que és un model amb molt bon ajust (R^2 proper a 1) i que les observacions que ha analitzat el software són 72. Es comprova que la mitjana és de 0,555 dins del rang esperat.

Taula 5. Resum de l'ajust lineal del model de l'anàlisi 1.

RESUM DE L'AJUST LINEAL DEL MODEL	
R^2	0,990248
R^2 ajustat	0,985575
Arrel de l'error quadràtic mitjà	0,027966
Mitjana de resposta	0,554997
Observacions	72

De la prova dels efectes es desprèn que 12 dels factors tenen efecte significatiu, sent els següents: Sensor, Orientació, Vigor, Alçada; les interaccions Sensor*Orientació, Sensor*Vigor, Orientació*Vigor, Sensor*Orientació*Vigor, Sensor*Alçada, Orientació*Alçada, Sensor*Orientació*Alçada, Sensor*Orientació*Vigor*Alçada; ja que tenen una probabilitat més petita que 0,05 i no es pot acceptar la hipòtesi nul·la. Això es troba resumit a la Taula 6, on les probabilitats inferiors a 0,05 estan marcades amb un asterisc a la última columna.

Taula 6. Prova dels efectes de l'anàlisi 1.

PROVA DELS EFECTES

Font	Nº de paràmetres	Graus de llibertat	Suma de quadrats	Raó F	Prob > F
SENSOR	1	1	3,1107662	3977,485	<,0001*
ORIENTACIÓ	1	1	0,3065184	391,9203	<,0001*
SENSOR*ORIENTACIÓ	1	1	0,2073895	265,1722	<,0001*
VIGOR	1	1	0,0194505	24,8698	<,0001*
SENSOR*VIGOR	1	1	0,0043338	5,5413	0,0227*
ORIENTACIÓ*VIGOR	1	1	0,0448901	57,3973	<,0001*
SENSOR*ORIENTACIÓ*VIGOR	1	1	0,0267653	34,2226	<,0001*
ALÇADA	2	2	0,0579711	37,0615	<,0001*
SENSOR*ALÇADA	2	2	0,0071269	4,5563	0,0154*
ORIENTACIÓ*ALÇADA	2	2	0,0071638	4,5799	0,0151*
SENSOR*ORIENTACIÓ*ALÇADA	2	2	0,0065025	4,1571	0,0216*
VIGOR*ALÇADA	2	2	0,0009719	0,6213	0,5415
SENSOR*VIGOR*ALÇADA	2	2	0,0016517	1,0560	0,3558
ORIENTACIÓ*VIGOR*ALÇADA	2	2	0,0043764	2,7979	0,0709
SENSOR*ORIENTACIÓ*VIGOR*ALÇADA	2	2	0,0059501	3,8040	0,0293*

DETALLS DELS EFECTES

Per tal de contestar les preguntes plantejades (I,II,III,IV) cal analitzar un per un els efectes que tenen significació fent una separació de mitjanes. S'utilitza el test *t* de Student si l'efecte en qüestió presenta dos nivells, o bé el test HSD de Tukey si en té més de dos. Els grups no connectats per la mateixa lletra són significativament diferents:

- I. La càmera *Mapir* funciona correctament suposant que el sensor *OptRx* sí que ho fa i el prenem de referència?

Es comparen els dos sensors ja que l'efecte del factor SENSOR ha resultat ser significatiu. A la Taula 7 (detall de l'efecte SENSOR) s'observa que el sensor *OptRx* proporciona valors significativament més alts que la càmera *Mapir*.

Taula 7. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a l'efecte Sensor.

SENSOR (t DE STUDENT, t=2,01063)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
OPTRX	A	0,76285556
MAPIR	B	0,34713889

No es pot afirmar, encara, que la càmera *Mapir* no funcioni correctament, cal analitzar amb detall en quines condicions ha resultat ser fiable:

II. Les dues cares laterals d'un arbre fruiter (Est i Oest) són iguals pel que fa a la lectura de l'NDVI?

A l'observar la Taula 8 (detall de l'efecte ORIENTACIÓ, també significatiu) sembla ser que en la cara assolellada (Est) els valors són més alts que en la cara ombrejada (Oest). Si s'observa l'efecte de la interacció SENSOR*ORIENTACIÓ (que també és significativa, Taula 9) es reafirma la conclusió que a la cara Est les lectures donen valors més alts de NDVI que a la cara Oest però només per la càmera *Mapir*, ja que aquest fet no succeeix per les lectures del sensor *OptRx*: que ha donat valors similars (sense diferències significatives) en ambdues orientacions (Est i Oest).

Taula 8. Detalls dels efectes: separació de mitjanes t de Student de l'efecte Orientació.

ORIENTACIÓ (t DE STUDENT, $t=2,01063$)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
EST	A	0,62024444
OEST	B	0,48975000

Taula 9. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció Sensor*Orientació.

SENSOR*ORIENTACIÓ (HSD DE TUKEY, $Q=2,66137$)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
OPTRX,EST	A	0,77443333
OPTRX, OEST	A	0,75127778
MAPIR,EST	B	0,46605556
MAPIR,OEST	C	0,22822222

III. Hi ha diferències entre vigors?

S'analitza l'efecte significatiu del factor VIGOR (Taula 10) i curiosament resulta que l'arbre de vigor baix dona valors més alts de NDVI que l'arbre de vigor alt, contràriament a l'esperat.

Taula 10. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a l'efecte Vigor.

VIGOR (t DE STUDENT, t=2,01063)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
BAIX	A	0,57143333
ALT	B	0,53856111

Per tal de trobar una explicació, s'inspecciona la interacció SENSOR*VIGOR (també significativa, Taula 11) i s'observa que el fet anteriorment comentat només és cert per la càmera *Mapir* i no pel sensor *OptRx*. Observant també la interacció significativa ORIENTACIÓ*VIGOR (Taula 12) es pot dir que el fet anterior només és cert per les lectures de la cara ombrejada (Oest).

Taula 11. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció Sensor*Vigor.

SENSOR*VIGOR (HSD DE TUKEY, Q=2,66137)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
OPTRX,BAIX	A	0,77153333
OPTRX,ALT	A	0,75417778
MAPIR,BAIX	B	0,37133333
MAPIR,ALT	C	0,32294444

Taula 12. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció Orientació*Vigor

ORIENTACIÓ*VIGOR (HSD DE TUKEY, Q=2,66137)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
EST,ALT	A	0,62877778
EST,BAIX	A	0,61171111
OEST,BAIX	B	0,53115556
OEST,ALT	C	0,44834444

Per tenir més informació sobre aquest fet s'inspecciona la interacció triple SENSOR*ORIENTACIÓ*VIGOR (també significativa per l'anàlisi, Taula 13) del qual se'n desprèn que:

- Les lectures del sensor *OptRx* sempre donen valors significativament més alts de NDVI en comparació amb els valors de les lectures de la càmera *Mapir*.

- Les lectures del sensor *OptRx* mostren homogeneïtat: no es veuen influenciades per l'orientació ni pel vigor.
- Les lectures de la càmera *Mapir* mostren una major heterogeneïtat, sent significativament diferents les lectures de la cara Est (majors) a les de la cara Oest (menors): sent aquesta última on l'NDVI de l'arbre de vigor baix és significativament major a l'arbre de vigor alt.

Taula 13. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció triple Sensor*Orientació*Vigor.

SENSOR*ORIENTACIÓ*VIGOR (HSD DE TUKEY, Q=3,16829)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
OPTRX,EST,BAIX	A	0,77742222
OPTRX,EST,ALT	A	0,77144444
OPTRX,OEST,BAIX	A	0,76564444
OPTRX,OEST,ALT	A	0,73691111
MAPIR,EST,ALT	B	0,48611111
MAPIR,EST,BAIX	B	0,44600000
MAPIR,OEST,BAIX	C	0,29666667
MAPIR,OEST,ALT	D	0,15977778

IV. És necessari discriminar per les diferents alçades de l'arbre (Alt, Mig i Baix)?

S'analitza l'efecte significatiu del factor ALÇADA (Taula 14) i s'observa que les tres alçades (Alt, Mig i Baix) són significativament diferents. El valor més alt d'NDVI s'obté a l'alçada 'baixa'; el valor més baix d'NDVI correspon a l'alçada més 'alta'. Aquest fet s'explicaria amb la porositat de la vegetació, ja que en la part alta de l'arbre n'hi ha més i per tant el valor d'NDVI és menor.

Taula 14. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a l'efecte de l'Alçada.

ALÇADA (HSD DE TUKEY, Q=2,41849)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
BAIX	A	0,58488750
MIG	B	0,56323958
ALT	C	0,51686458

Per determinar si és necessari discriminar per alçades cal tenir en compte les interaccions que han resultat ser significatives per l'anàlisi:

De la interacció SENSOR*ALÇADA (Taula 15) se'n pot observar que la càmera *Mapir* difereix clarament la part 'alta' de la resta de la canòpia (Mig i Baix) mentre que el sensor *OptRx* és més subtil al tenir valors més semblants entre part Alt-Mig i part Mig-Baix.

Taula 15. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció Sensor*Alçada

SENSOR*ALÇADA (HSD DE TUKEY, Q=2,9679)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
OPTRX,BAIX	A	0,78910833
OPTRX,MIG	A B	0,76114583
OPTRX,ALT	B	0,73831250
MAPIR,BAIX	C	0,38066667
MAPIR,MIG	C	0,36533333
MAPIR,ALT	D	0,29541667

De la interacció ORIENTACIÓ*ALÇADA se'n desprèn que la diferència entre la part 'Alt' (menor NDVI) – 'Mig-Baix' (major NDVI) és més patent per la cara Est que per la cara Oest.

Taula 16. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció Orientació*Alçada

ORIENTACIÓ*ALÇADA (HSD DE TUKEY, Q=2,9679)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
EST,BAIX	A	0,65110833
EST,MIG	A	0,64018750
EST,ALT	B	0,56943750
OEST,BAIX	C	0,51866667
OEST,MIG	C D	0,48629167
OEST,ALT	D	0,46429167

Cal finalment tenir en compte la interacció triple SENSOR*ORIENTACIÓ*ALÇADA (Taula 17) per completar la interpretació.

Taula 17. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció triple Sensor*Orientació*Alçada.

SENSOR*ORIENTACIÓ*ALÇADA (HSD DE TUKEY, Q=3,43374)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
OPTRX,EST,BAIX	A	0,79021667
OPTRX,OEST,BAIX	A	0,78800000
OPTRX,EST,MIG	A	0,78404167
OPTRX,EST,ALT	A B	0,74904167
OPTRX,OEST,MIG	A B	0,73825000
OPTRX,OEST,ALT	B	0,72758333
MAPIR,EST,BAIX	C	0,51200000
MAPIR,EST,MIG	C	0,49633333
MAPIR,EST,ALT	D	0,38983333
MAPIR,OEST,BAIX	E	0,24933333
MAPIR,OEST,MIG	E	0,23433333
MAPIR,OEST,ALT	E	0,20100000

De la qual s'observa que:

- El sensor *OptRx* té un comportament més homogeni en totes les condicions de mesura excepte quan es mesura l'alçada Alt de la cara Oest dels arbres (valors significativament més baixos).
- La càmera *Mapir* sempre dona valors menors en les seves lectures respecte el sensor *OptRx* i, a part, mostra una major heterogeneïtat. Les seves lectures es poden classificar en tres grups significativament diferents (de major a menor NDVI): cara Est alçada Baix i Mig, cara Est alçada Alt i cara Oest.

Gràcies a la Taula 18 es pot demostrar que el sensor *OptRx* ofereix unes lectures pràcticament sense variacions importants segons el vigor, orientació de la lectura o l'alçada, fet que justifica l'ús d'aquest sensor per al segon experiment d'aquest estudi.

Taula 18. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció Sensor*Orientació*Vigor*Alçada.

SENSOR*ORIENTACIÓ*VIGOR*ALÇADA (HSD DE TUKEY, Q=3,85446)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
OPTRX,EST,ALT,MIG	A B	0,78988333
OPTRX,OEST,ALT,BAIX	A B	0,78460000
OPTRX,EST,ALT,BAIX	A B	0,78223333
OPTRX,EST,BAIX,MIG	A B	0,77820000
OPTRX,OEST,BAIX,MIG	A B	0,75953333
OPTRX,EST,BAIX,ALT	A B	0,75586667
OPTRX,OEST,BAIX,ALT	A B	0,74600000
OPTRX,EST,ALT,ALT	A B	0,74221667
OPTRX,OEST,ALT,MIG	A B	0,71696667
OPTRX,OEST,ALT,ALT	B	0,70916667
MAPIR,EST,ALT,BAIX	C	0,53633333
MAPIR,EST,ALT,MIG	C	0,53233333
MAPIR,EST,BAIX,BAIX	C	0,48766667
MAPIR,EST,BAIX,MIG	C D	0,46033333
MAPIR,EST,BAIX,ALT	D E	0,39000000
MAPIR,EST,ALT,ALT	D E	0,38966667
MAPIR,OEST,BAIX,BAIX	E F	0,34300000
MAPIR,OEST,BAIX,MIG	F G	0,30066667
MAPIR,OEST,BAIX,ALT	G H	0,24633333
MAPIR,OEST,ALT,MIG	H I	0,16800000
MAPIR,OEST,ALT,ALT	I	0,15566667
MAPIR,OEST,ALT,BAIX	I	0,15566667

4.2.2. Experiment 1 (Anàlisi 2): Comparació dels angles de visió lateral i zenital

A la Taula 19 del resum de l'ajust lineal del model es comprova que és un model molt ben ajustat (R^2 proper a 1) i que les observacions que ha analitzat el software són 60.

Taula 19. Resum de l'ajust lineal del model de l'anàlisi 2.

RESUM DE L'AJUST	
R^2	0,953393
R^2 ajustat	0,944898
Arrel de l'error quadràtic mitjà	0,029746
Mitjana de resposta	0,365575
Observacions	60

De la prova dels efectes se'n desprèn que els dos factors i la interacció d'ells dos tenen efecte significatiu per al model ja que tenen una probabilitat més petita que 0,05 i no es pot acceptar la hipòtesi nul·la, com es pot veure a la Taula 20.

Taula 20. Prova dels efectes de l'anàlisi 2.

PROVA DELS EFECTES					
Font	Nº de paràmetres	Graus de llibertat	Suma de quadrats	Raó F	Prob > F
VISIÓ	4	4	0,74972727	211,8271	<,0001*
VIGOR	1	1	0,03297070	37,2620	<,0001*
VISIÓ*VIGOR	4	4	0,12048073	34,0405	<,0001*

DETALLS DELS EFECTES

Per tal de contestar la pregunta plantejada (V) cal analitzar un per un els efectes que tenen significació fent una separació de mitjanes. S'utilitza el test *t* de Student si l'efecte en qüestió té dos nivells de significació o bé el test HSD de Tukey si en té més de dos. Els grups no connectats per la mateixa lletra són significativament diferents:

V. Varien les lectures zenitals de les laterals?

Els dos efectes (VISIÓ i VIGOR) han resultat ser significatius.

Observant la Taula 21 (detall de l'efecte VISIÓ) i la Taula 22 (detall de l'efecte VIGOR) es comprova que hi ha diferències significatives entre els cinc punts de vista i entre els dos vigors mesurats. Cal analitzar la interacció dels dos, VISIÓ*VIGOR per matisar les diferències de VISIÓ en funció del VIGOR; o a la inversa, que la diferència entre vigors només és significativa des de certs punts de vista.

Taula 21. Prova dels efectes: separació de mitjanes per a l'efecte Visió.

VISIÓ (HSD DE TUKEY, $Q=2,82981$)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
<i>EST_MB</i>	A	0,50416667
<i>ZEN</i>	B	0,45462500
<i>EST_A</i>	C	0,39750000
<i>OEST_MB</i>	D	0,25358333
<i>OEST_A</i>	E	0,21800000

Taula 22. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a l'efecte Vigor.

VIGOR (t DE STUDENT, $t=2,00856$)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
<i>BAIX</i>	A	0,38901667
<i>ALT</i>	B	0,34213333

S'analitza doncs la interacció VISIÓ*VIGOR (Taula 23) per resoldre el fet esmentat anteriorment i s'observa que:

- Les diferències entre vigors (Alt i Baix) són significatives pels angles de visió Est Mig-Baix (on NDVI és major en vigor Alt), Oest Mig-Baix i Oest Alt (curiosament, en aquesta cara l'NDVI de l'arbre de vigor Baix és més alt que l'arbre de vigor Alt).
- Pel que fa als angles de visió (probablement la part més important) s'observa que l'ordre inicial (de valor Alt a valor Baix de NDVI: Est Mig-Baix, ZENital, Est Alt, Oest Mig-Baix, Oest Alt) no es compleix per als dos vigors. En arbres de vigor Alt la cara Oest no presenta diferències significatives segons l'alçada mentre que en arbres de vigor Baix les visions Est Mig-Baix, ZENital i Est Alt són similars (no presenten diferències significatives).

Taula 23. Detalls dels efectes: separació de mitjanes per a la interacció Visió*Vigor.

VISIÓ*VIGOR (HSD DE TUKEY, Q=3,31028)

Nivell	Grup	Mitjana de mínims quadrats
EST_MB,ALT	A	0,53433333
EST_MB,BAIX	B	0,47400000
ZEN,ALT	B	0,46833333
ZEN,BAIX	B C	0,44091667
EST_A,BAIX	C D	0,41133333
EST_A,ALT	D E	0,38366667
OEST_MB,BAIX	E	0,34533333
OEST_A,BAIX	F	0,27350000
OEST_A,ALT	G	0,16250000
OEST_MB,ALT	G	0,16183333

Es podria concloure que la visió zenital pot ser equivalent a la lateral (Est) en arbres de menor desenvolupament (vigor Baix); en arbres més voluminosos (de més vigor), la visió zenital no dona una idea real de l'NDVI de l'arbre (cara Est), probablement degut a la menor penetració dels rajos de llum.

4.2.3. Experiment 2: Variació espacial de l'NDVI al llarg de la fila

Els resultats del segon experiment es mostren a continuació a fi de respondre a les preguntes proposades (I i II) a l'apartat 3.4.1.

I. La variació espacial de l'NDVI lateral al llarg de la fila segueix un patró?

A la Figura 16 es representa el semi-variograma de l'NDVI de la filera lateral Est. El fet que l'ordenada (punt on la recta talla l'eix Y, distància C_0) no és a l'origen de coordenades indica que a molt poca distància el valor NDVI canvia molt. És a dir, l'NDVI varia a distàncies menors que la de mostreig utilitzada (en aquest cas uns 12 cm).

El fet que el semi-variograma no s'estabilitzi (distància C_1) indica que a major distància entre posicions dins la filera, major és la diferència entre valors d'NDVI.

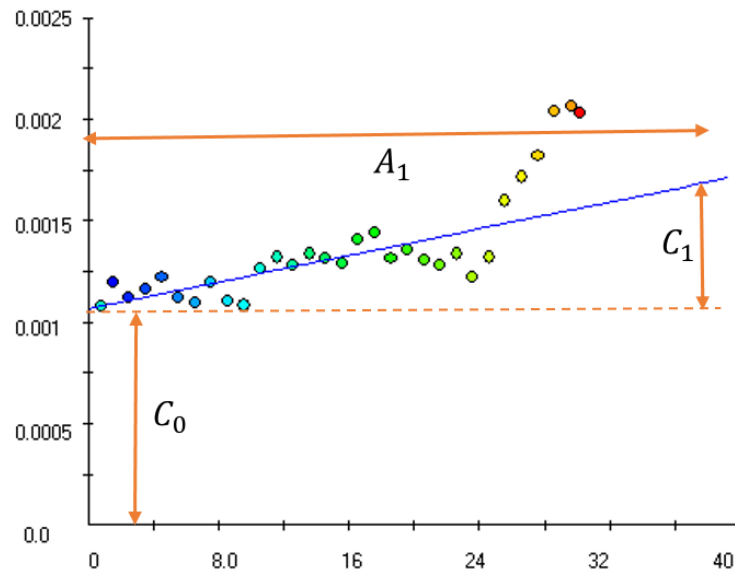


Figura 16. Semi-variograma de l'NDVI de la filera lateral Est.

Per tal d'observar de manera visual com varia l'NDVI al llarg de la filera s'ha mapat el valor d'NDVI (Figura 17), el qual està uns centímetres desplaçat a l'Est per la distància de mesura.



Figura 17. Mapa interpolat de l'NDVI de la filera amb lectures des de la cara Est (sensor OptRx).

II. Hi ha una variació periòdica lligada al marc de plantació?

Com es pot veure a la Figura 18, gràfic del perfil NDVI i la posició dels arbres, es pot confirmar una certa relació entre els pics de valor NDVI més elevat ($NDVI > 0,8$) i la posició del peu dels arbres. Aquest pic pot estar lleugerament desplaçat en l'espai respecte al peu de l'arbre (pocs centímetres) degut a petits errors de geo-localització o del tractament de dades. Tanmateix, el número de pics de NDVI i el número d'arbres coincideixen en un rang de distància prou ampli del perfil NDVI (de la filera d'arbres).

El fet que on hi hagi el tronc de l'arbre coincideixi amb un pic d'NDVI es pot explicar degut a que l'arbre creix entorn el tronc i és on té menys porositat. Entremig d'un arbre i el següent és lògic que el valor NDVI sigui més baix degut a una major porositat de la vegetació.

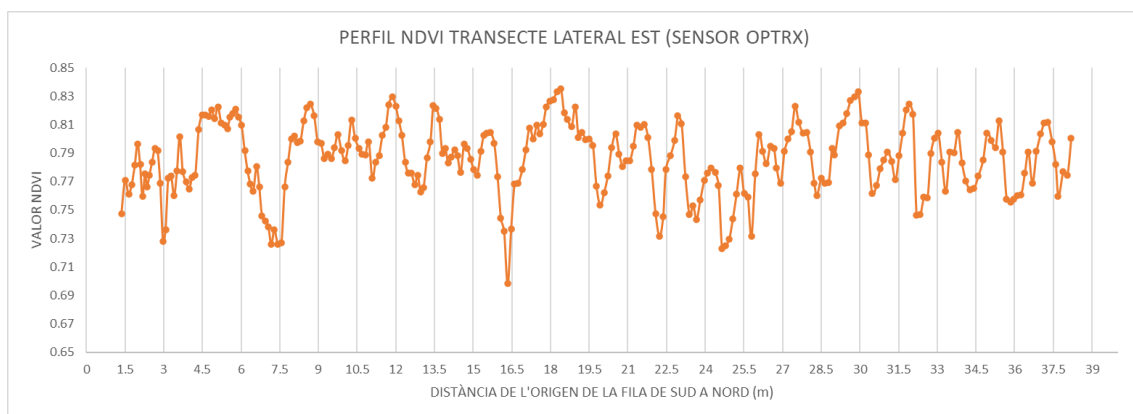


Figura 18. Gràfic del perfil NDVI de la filera lateral, sobreposat al marc de plantació: els arbres estan cada 1,5 m (línies verticals).

4.3. Reconstrucció de fotogrametria

Finalment només es poden reconstruir 6 mapes 3D a partir de les imatges NDVI processades i calibrades, que són les de la llista següent:

- Arbre 4 EST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Arbre 20 EST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Fila ZENITAL x 2 intents a partir de 70 imatges a l'anada i 79 imatges a la tornada.

És a dir, només s'ha pogut reconstruir a partir de les imatges NDVI dels arbres individuals per la cara EST (no per la cara OEST) i pel transsecte Zenital (i no pels Laterals).

En resum, NO s'han pogut obtenir les reconstruccions per les següents vistes:

- Arbre 4 OEST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Arbre 20 OEST x 2 intents a partir de 16 imatges.
- Fila LATERAL EST a partir de 31 imatges.
- Fila LATERAL OEST a partir de 33 imatges.

El fet que cap dels intents per la cara Oest hagi tingut èxit indica que la cara no il·luminada no serveix per obtenir dades fiables (almenys per aquest assaig, i almenys per aquesta a configuració de la càmera), com ja havia indicat el software de correcció MCC.

Els mapes de píxels 3D creats amb èxit (Figura 19 i Figura 20) sí que conserven valor NDVI, coordenades XYZ i es poden exportar a altres programes que permetin realitzar estudis més específics, eliminar porositat, eliminar fons, eliminar fruits, etc.

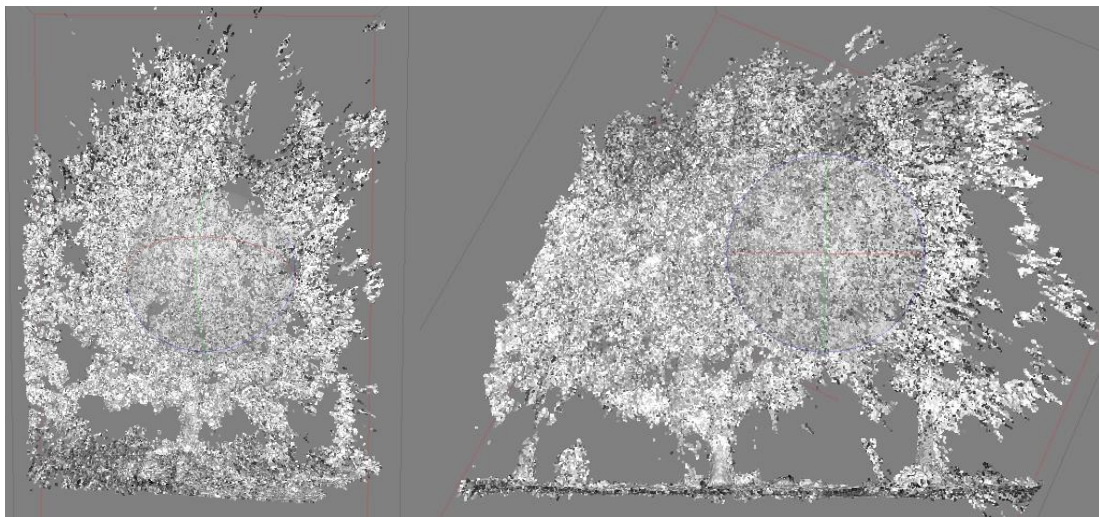


Figura 19. Mapa de punts 3D de la vista lateral Est. A l'esquerre peu 4 a la dreta peu 20.

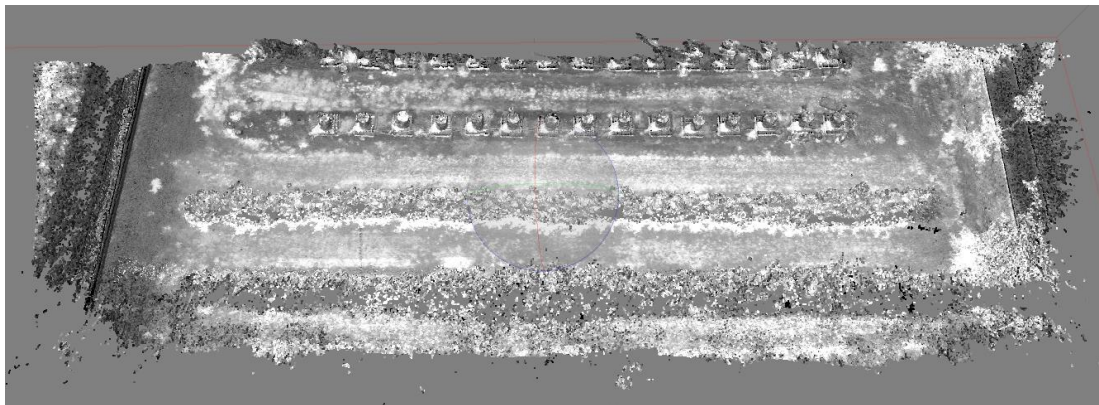


Figura 20. Mapa de punts 3D de la vista Zenital.

5. ESTUDI D'INTERÈS EN FRUCTICULTURA DE PRECISIÓ

En aquest apartat s'estudia quina podria ser la magnitud de l'impacte d'incorporar la càmera *Mapir Survey3* en el maneig d'una explotació fructícola per tal de quantificar l'interès que podria tenir seguir realitzant estudis per incorporar aquesta tecnologia en equips agrícoles. Per fer-ho es va proposar un assaig que consistia en comparar la quantitat de producte fitosanitari que s'hauria aplicat en la fila estudiada en algun tractament en el moment de l'assaig (finals de juliol), per exemple, contra la *Psila*.

Es va utilitzar la calculadora online del sistema de suport a la decisió *DOSA3D* per conèixer quin hauria de ser el volum d'aplicació del tractament (en l/ha). *DOSA3D* és un programa virtual que, a partir del marc de plantació, el tipus de tractament, el tipus i condicions d'aplicació i el tipus d'arbre, calcula el volum d'aplicació mínim recomanat a partir d'una primera estimació de la superfície de paret foliar (m^2/ha) i del volum de vegetació (m^3/ha) (GRAP, 2018).

Per tal de comparar diferents nivells d'aplicació tecnològica, de menys a més, es va calcular quin seria el volum aplicat a la filera amb les següents situacions:

- Aplicació amb polvoritzador hidropneumàtic convencional.
- Aplicació amb polvoritzador hidropneumàtic amb deflectors.
- Aplicació amb polvoritzador hidropneumàtic amb deflectors i ajust del volum d'aplicació a temps real a partir de lectures NDVI del sensor *OptRx*.
- Aplicació amb polvoritzador hidropneumàtic amb deflectors i ajust del volum d'aplicació en base a un mapa de prescripció elaborat a partir de lectures NDVI de la càmera *Mapir*.

Es partia de la base del volum d'aplicació calculat amb *DOSA3D* per l'aplicació tradicional i d'incloure deflectors en l'aplicació: ja suposava un estalvi notable de quantitat de producte aplicat. Les condicions d'aplicació eren ideals en quant a humitat, temperatura, vent i velocitat d'aplicació: resumits a la Taula 24.

Taula 24. Paràmetres introduïts al programa DOSA3D.

Paràmetres per al càlcul del volum d'aplicació DOSA3D

<i>Espècie cultivada</i>	Perer
<i>Varietat</i>	Blanquilla
<i>Superfície cultivada</i>	0,018 ha (marc de plantació x llargada fila)
<i>Distància entre peus</i>	1,5 m
<i>Amplada del carrer</i>	4,5 m
<i>Altura de la capçada</i>	De 3,0 m a 4,0 m
<i>Amplada transversal de la capçada</i>	De 1,0 m a 2,0 m
<i>Estadi fenològic</i>	BBCH: 71-75
<i>Plaga o malaltia</i>	Psila
<i>Velocitat d'avançament</i>	Recomanada: < 5 km/h
<i>Temperatura</i>	Recomanada: 10 °C a 20 °C
<i>Humitat relativa</i>	Mitja: 35 % a 60 %
<i>Velocitat del vent</i>	Calma: < 0,1 m/s

El programa calculava el volum d'aplicació mínim (en l/ha) que s'havia d'aplicar per obtenir una eficiència d'aplicació acceptable fos quin fos el vigor i la massa foliar al llarg de tota la filera, amb i sense deflectors. Els resultats, a partir dels quals es va realitzar l'estudi de l'estalvi de producte fitosanitari procedents de la simulació realitzada amb el programa DOSA3D, es troben a la Taula 25.

Taula 25. Resultats del càlcul del programa DOSA3D.

Resultats del càlcul del volum d'aplicació DOSA3D

<i>Densitat de plantació</i>	1481 arbres/ha
<i>Índex d'àrea foliar (LAI) estimat</i>	2,4
<i>Superfície de paret foliar (LWA)</i>	17778 m ² /ha
<i>Volum de vegetació (TRV)</i>	17778 m ³ /ha
<i>Eficiència de l'aplicació</i>	47 %
<i>Volum mínim aplicació convencional</i>	860 l/ha
<i>Volum mínim aplicació amb deflectors</i>	700 l/ha

A l'afegir el sensor actiu *OptRx* a l'equip amb deflectors, es podia dissenyar un sistema que variés el volum d'aplicació en temps real per tal de fer correspondre el volum d'aplicació mínim (calculat amb *DOSA3D*, amb deflectors) amb el pic de màxim NDVI: on els arbres de la filera se suposava que tenien major densitat de vegetació al tenir el vigor màxim i se suposava que el volum d'aplicació havia d'anar en funció del vigor. Caldria però fer un tempteig de quin seria el valor màxim del pic de NDVI per tal d'ajustar la resta de valors de la filera amb el seu volum d'aplicació corresponent. Se suposava també que l'equip era capaç de variar el volum d'aplicació instantàniament als canvis de vegetació a partir de NDVI amb un únic volum d'aplicació per tota l'alçada de l'arbre.

Per altra banda, i tenint en compte els resultats exposats en aquest mateix estudi, es va afegir al sistema d'aplicació la càmera *Mapir*: al requerir un post tractament de dades més laboriós no podia ser instal·lat en el mateix aplicador. Calia doncs contemplar la realització d'un estudi previ a la filera (similar al que s'ha realitzat en aquest projecte) per tenir la informació necessària i per elaborar un mapa de prescripció i poder fer una aplicació variable discriminant per alçades.

A partir de la informació extreta de la secció de resultats d'aquest estudi, concretament de la Taula 15, s'observa que la càmera *Mapir* discrimina dues alçades diferents: l'alçada 'alta' i l'alçada 'baixa i mitja', de 1 m i 2 m d'alçada respectivament, i a més a més, s'observa que la part 'alta' té de mitjana un valor NDVI al voltant d'un 20 % més baix que la mitjana de la zona 'baixa i mitja'. Al realitzar l'aplicació amb un polvoritzador hidropneumàtic amb deflectors i volum d'aplicació variable per broquets, s'entenia que es podria discriminar el volum d'aplicació per les dues alçades significativament diferents i per NDVI per tal d'obtenir un estalvi en la quantitat de producte aplicat.

Per obtenir el mapa de prescripció s'haurien d'obtenir lectures de la part 'alta' i de la part 'baixa i mitja' per separat (utilitzant dues càmeres *Mapir*, o utilitzant-ne una amb dues vegades). Aquest mapa de prescripció hauria de tenir informació de posicionament i dels dos valors d'aplicació (un per l'alçada 'alta' i l'altre per l'alçada 'baixa i mitja') i l'equip d'aplicació hauria de ser capaç de dur a terme les dues aplicacions variables al mateix temps.

Es va calcular quin seria el producte aplicat en les quatre situacions plantejades i quantificar quin seria l'estalvi que s'obtenia aplicant aquesta tecnologia en l'aplicació, si és que n'hi havia, a partir de la mitjana del volum d'aplicació (en l/ha) i la superfície d'aplicació (ha).

La Figura 21 mostra el volum de producte fitosanitari que hagués calgut aplicar (en l/ha) per cada unitat lineal de filera utilitzant els quatre tipus d'equips proposats.

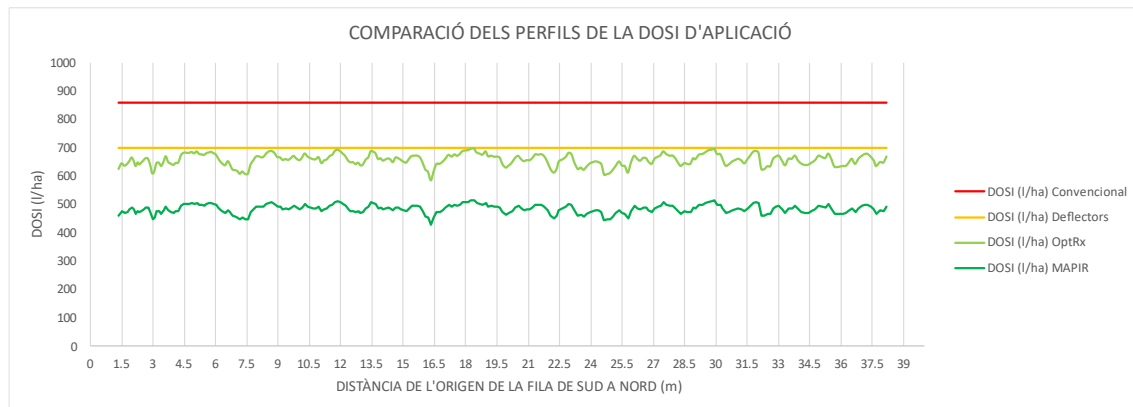


Figura 21. Gràfic del volum d'aplicació (en l/ha) calculat per quatre equips d'aplicació de fitosanitaris al llarg de la filera.

A simple vista s'observa una diferència molt notable entre els quatre equips en el que l'equip tradicional manté constant volum d'aplicació molt elevada de 860 l/ha per tota la filera; també es manté constant però amb un volum d'aplicació més contingut de 700 l/ha; l'equip en que s'hauria instal·lat el sensor actiu *OptRx* amb un sistema que permetés variar volum d'aplicació instantàniament en temps real a partir de les lectures del sensor adequant el volum d'aplicació mínima al punt de màxim NDVI, manté un volum d'aplicació variable entre 600 l/ha i 700 l/ha; l'equip que incorporaria la tecnologia estudiada (la càmera *Mapir*) que a partir d'un estudi previ de l'NDVI hagués permès discriminar dues alçades diferents amb un diferent comportament de NDVI, hauria mantingut un volum d'aplicació d'entre 400 l/ha i 500 l/ha.

Per tenir una idea més clara de l'estalvi es van calcular els valors absoluts de volum aplicat a la fila d'arbres perers per als quatre equips (en litres) i l'estalvi respecte l'equip convencional (en percentatge), resumit a la Taula 26.

Taula 26. Volum aplicat dels quatre equips per l'aplicació de fitosanitari.

Volum aplicat per al tractament fitosanitari

Equip	Volum aplicat	Estalvi respecte equip convencional
<i>Convencional</i>	15,48 l	-
<i>Amb deflectors</i>	12,60 l	18,60 %
<i>En temps real (OptRx)</i>	11,90 l	23,13 %
<i>En base a mapa (Mapir)</i>	8,76 l	43,42 %

Els resultats són clars: a mesura que s'incorpora tecnologia l'estalvi és major. Cal tenir en compte, però, el cost de la tecnologia i l'increment de temps de les tasques que sovint ocasiona. Per exemple, el sensor *OptRx* té un cost d'adquisició de 2000 euros mentre que la *Mapir* uns 500 euros (incloent l'estoig de calibratge). Cal tenir en compte, també, que per als equips convencional, amb deflectors i amb sensor *OptRx* no caldria fer un estudi previ; sí per l'equip de la *Mapir*: caldria fer un estudi previ per trobar diferències entre alçades (en aquest cas). En ambdues opcions cal contemplar l'ús d'equips de posicionament.

6. CONCLUSIONS

Un cop comparats els dos sensors i suposant que el sensor *OptRx*, del qual se'n té molta bibliografia, es pot prendre com a sensor de referència es pot concloure que el sensor *Mapir* si no s'utilitza en unes condicions d'il·luminació determinades, les lectures no són fiables.

Les condicions de llum han de ser les següents:

- Que el sensor no rebi la llum directament (ja que es satura pel reflex de la lent pre-focal). Es pot evitar amb la utilització d'alguna mena de visera o para-sol.
- Que no hi hagi ombres a l'objectiu, ja que al tractar-se d'un sensor passiu interpreta les ombres com a zones de NDVI més baix.

Per tant, s'hauria de treballar amb el sensor d'esquena al sol i a una distància la qual el sensor, mecanismes, suports o operari no faci ombra a l'objectiu, condicions difícils de complir al camp.

També es pot concloure que la cara Est i Oest no són diferents si s'utilitza el sensor *OptRx* però sí que ho són si s'utilitza el sensor *Mapir*, per tant a l'utilitzar el sensor *Mapir* cal tenir en compte quin dels dos costats està ben il·luminat i treballar amb les dades d'aquest, en representació dels dos costats. A més a més, al sensor *OptRx* no li afecta el vigor.

En canvi, la càmera *Mapir* està subjecta a una major variació depenent de les condicions d'ús. La càmera mostra una clara diferència entre les lectures entre orientacions (la cara Est, més il·luminada, sempre té valors més alts d'NDVI que Oest, menys il·luminada). Cal remarcar que per la cara Est, l'NDVI de la part Alt dels dos arbres de vigors diferents és menor que per la part Mig-Baix (també en lectures de l'*OptRx*); per la cara Oest, la diferència no és tant notable, però sí entre els dos vigors, ja que per sorpresa el valor d'NDVI en arbre de vigor Baix és major que per l'arbre de vigor Alt. És interessant distingir la part Alta de la part Mitja-Baixa de l'arbre degut a una menor densitat de la massa foliar.

Del segon anàlisi és important assenyalar que les lectures zenitals són similars a les lectures laterals Mig i Baix (sobretot en arbres de baix vigor) les quals donen valors més alts

d'NDVI que les mesures laterals Alt. Aquest fet es pot explicar, segurament, degut a la penetració dels raigs de llum a la vegetació més porosa de la part alta de l'arbre, els quals mesuren, més aviat, l'NDVI de la part Mig-Baix de l'arbre.

En resum es pot dir que les mesures zenitals són similars a les mesures laterals (Est) però en arbres de baix vigor. En arbres d'alt vigor s'observa major diferència entre les mesures zenitals i les laterals Est. Les mesures de la cara Oest es desmarquen a les de qualsevol altre punt de vista, motiu pel qual es descarten per propers experiments (no semblen fiables). Per tant, segons el tipus d'il·luminació a que estigui sotmès l'objectiu i segons les possibilitats logístiques cal actuar en conseqüència buscant la cara il·luminada i, si no és possible, la zenital.

A partir del variograma de la variable NDVI, el qual no s'estabilitza, es pot concloure que caldria una major longitud de fila per comprovar si realment existeix un rang o distància d'autocorrelació espacial dins de la filera.

El fet que existeixi un efecte "nugget" (l'ordenada no és a l'origen de coordenades), indica que amb molt poca distància entre lectures, aquestes poden variar molt, i com a conseqüència, s'ha de realitzar una presa de dades amb molta resolució, ja que al contrari, no s'obtindrien dades representatives de la realitat.

És interessant obtenir un mapa de punts 3D NDVI per la quantitat d'informació que se'n pot extreure i també molt important de la manera que es pot extreure. Es podria obtenir una reconstrucció de fotogrametria de tota la fila sencera per les cares ben il·luminades. Inclús seria viable obtenir-la de tota la parcel·la o àmplies zones de mostreig.

Per prendre les dades laterals per a la reconstrucció s'ha d'utilitzar el sensor *Mapir* en posició horitzontal, per aconseguir un major solapament entre imatges (al tenir un camp de visió molt més gran).

Tanmateix, la limitació de l'amplada de carrer del marc de plantació causa que no càpiga tot l'arbre sencer en vertical (poca distància entre sensor i objectiu), però obtenint les imatges de la part Mig-Baix (comparable amb vista Zenital) caldria estudiar si seria viable afegir-les a la reconstrucció, obtenint així un mapa de punts 3D NDVI força complert prescindint de la part Alta de l'arbre.

Per altra banda, i motivant futurs estudis, s'observa que aquesta tecnologia (*Mapir*) és molt interessant ja que dona molta informació que ben utilitzada pot suposar un elevat estalvi d'inputs (cada vegada més limitats) o més ben dit, permetria optimitzar-ne l'ús significativament a partir d'un estudi que caldria, però, estudiar-ne la automatització i adequar l'ajust del polvoritzador en conseqüència.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abousalh-Neto, N., Guan, M., Hummel, R., 2021. Better together: Extending JMP ® with open-source software. Stat 10, e336. <https://doi.org/10.1002/sta4.336>
- Agisoft, 2021. Agisoft Metashape Features [WWW Document]. User Man. Prof. Ed. Version 1.6. URL <https://www.agisoft.com/features/professional-edition/> (accedit 3.17.20).
- Bietresato, M., Carabin, G., D'Auria, D., Gallo, R., Ristorto, G., Mazzetto, F., Vidoni, R., Gasparetto, A., Scalera, L., 2016. A tracked mobile robotic lab for monitoring the plants volume and health. MESA 2016 - 12th IEEE/ASME Int. Conf. Mechatron. Embed. Syst. Appl. - Conf. Proc. 0-5. <https://doi.org/10.1109/MESA.2016.7587134>
- Boiarskii, B., 2019. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. J. Mech. Contin. Math. Sci. spl1. <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- CFIBAS (Centro Federal de Investigaciones biológicas para Agricultura y silvicultura), 2001. Estadios de las plantas mono-y dicotyledóneas. BBCH Monogr. 2, 149.
- GRAP, 2021. GRAP [WWW Document]. URL <http://www.grap.udl.cat/presentacio/index.html> (accedit 3.17.20).
- GRAP, 2018. DOSA3D [WWW Document]. URL <http://www.dosa3d.cat/> (accedit 9.11.21).
- ISPA, 2015. Proceedings | International Society of Precision Agriculture [WWW Document]. Precis. Agric. Defin. URL <https://www.ispag.org/%0Ahttps://ispag.org/proceedings/?action=abstract&id=381&search=authors> (accedit 1.31.21).
- MAPIR, 2016. Cameras - MAPIR CAMERA [WWW Document]. Agrolink Portal Agro. URL <http://www.mapir.camera/collections/cameras> (accedit 12.20.19).
- Mathworks, 2021. MathWorks - MATLAB [WWW Document]. URL https://www.mathworks.com/company/aboutus/contact_us.html?s_tid=gn_cntus (accedit 3.17.20).

- Minasny, B., McBratney, A.B., Whelan, B.M., 2005. VESPER version 1.62. Aust. Cent. Precip. Agric. McMillan Build. A 5.
- Moore, H., 2007. Matlab para ingenieros 2, 624.
- Perry, E.M., Goodwin, I., Cornwall, D., 2018. Remote sensing using canopy and leaf reflectance for estimating nitrogen status in red-blush pears. HortScience 53, 78-83. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12391-17>
- Perry, E.M., Pierce, F.J., Davenport, J.R., Smithyman, J., 2009. Comparing active optical and airborne measurements of grape canopies. Acta Hort. 824, 75-84. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.824.8>
- QGIS Development Team, 2016. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Found. Proj.
- Research Services Branch, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, U., s.d. ImageJ [WWW Document]. URL <https://imagej.nih.gov/ij/docs/intro.html> (accedit 3.17.20).
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, Progress Report RSC 1978-1.

8. ANNEXOS

8.1. ANNEX I

CODIS DE LES FUNCIONS DEL PROGRAMA MATLAB

FUNCIO *channels.m*:

```
function channels(folder,name)

img = imread([folder '\' name]); % Read image
red = img(:,:,1); % Red channel
green = img(:,:,2); % Green channel
blue = img(:,:,3); % Blue channel
a = zeros(size(img, 1), size(img, 2));
just_red = cat(3, red, a, a);
just_green = cat(3, a, green, a);
just_blue = cat(3, a, a, blue);
back_to_original_img = cat(3, red, green, blue);
%figure, imshow(img), title('Original image')
%figure, imshow(just_red), title('Red channel')
%figure, imshow(just_green), title('Green channel')
%figure, imshow(just_blue), title('Blue channel')
%figure, imshow(back_to_original_img), title('Back to original image')
red=double(red);
blue=double(blue);
resta=(blue-red);
suma=(blue+red);
div=resta./suma;
timg=single(div);
%figure, imshow(div), title('NDVI')
name2=extractBefore(name,'.JPG');
%imwrite(div,[folder '\' name2 'NDVI.tif'],'tiff','Compression','none');
t = Tiff([folder '\' name2 'NDVI.tif'], 'w');
tagstruct.ImageLength = size(timg, 1);
tagstruct.ImageWidth = size(timg, 2);
```

```
tagstruct.Compression = Tiff.Compression.None;  
tagstruct.SampleFormat = Tiff.SampleFormat.IEEEF;  
tagstruct.Photometric = Tiff.Photometric.MinIsBlack;  
tagstruct.BitsPerSample = 32;  
tagstruct.SamplesPerPixel = 1;  
tagstruct.PlanarConfiguration = Tiff.PlanarConfiguration.Chunky;  
t.setTag(tagstruct);  
t.write(timg);  
t.close();  
end
```

FUNCIÓ *main.m*:

```
clear all  
clc  
listing = dir('**\*.jpg');  
for i=1:length(listing)  
    pathfilename=listing(i).name;  
    pathfolder=listing(i).folder;  
    channels(pathfolder,pathfilename);  
    i  
end
```